LIBRAIRIE ALAIN BRIEUX
48, rue Jacob - 75006 Paris
Tél. : 01 42 60 21 98

Guy Potter

# LA LUMIÈRE.

ΑΕΙ Ο ΘΕΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΕΙ

Digitized by the Internet Archive
in 2018 with funding from
Getty Research Institute

https://archive.org/details/lalumieresixleco00tynd

Eng^d Bell & Fleet from a Photograph by Mora New York

John Tyndall

PROFESSOR TYNDALL

D.C.L. LL.D. F.R.S.

[illegible]

# LA

# LUMIÈRE,

PAR

JOHN TYNDALL, LL.D., F.R.S.,

PROFESSEUR DE PHILOSOPHIE NATURELLE A L'INSTITUTION ROYALE
DE LA GRANDE-BRETAGNE.

---

## SIX LEÇONS

FAITES EN AMÉRIQUE DANS L'HIVER DE 1872-1873.

---

OUVRAGE TRADUIT DE L'ANGLAIS

PAR M. L'ABBÉ MOIGNO.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,
Quai des Augustins, 55.

1875

(Tous droits réservés.)

# PRÉFACE DU TRADUCTEUR.

La Lumière de M. Tyndall ne ressemble à aucun des Traités qu'il m'a été donné d'étudier et d'analyser, en si grand nombre, dans mon *Répertoire d'Optique moderne* et plus tard.

Ce n'est pas un Traité élémentaire, car il comprend les phénomènes les plus délicats, ceux même que nos programmes du baccalauréat écartent de l'enseignement classique; et ce n'est pas non plus un Traité d'Optique supérieure, puisqu'il est la rédaction de Leçons faites devant un auditoire d'hommes et de femmes du monde.

Ce n'est pas un Traité d'Optique physique, car il donne la raison mécanique de chaque phénomène, et ce n'est pas un Traité d'Optique mathématique, car le calcul n'y joue aucun rôle.

Ce n'est pas un Traité d'Optique expérimentale, car le raisonnement domine tout, car l'analyse et la synthèse y prennent une part considérable; et ce n'est pas un Traité d'Optique rationnelle, car il se résume tout entier dans la production des phénomènes sur la plus large échelle qu'on puisse imaginer, en les rendant visibles à un immense auditoire.

Qu'est-il donc et comment le caractériserons-nous? En disant qu'il est tout à la fois, dans son unité merveilleuse, élémentaire et supérieur, physique et mathématique, expérimental et rationnel; qu'il constitue un mode d'enseignement *sui generis*, analytique et synthétique à la fois, vraiment nouveau et admirable en soi.

Singulière dans le fond, *la Lumière* est non moins singulière dans la forme. Au premier aspect, et parce qu'elle est en réalité la rédaction de Leçons improvisées, cette forme semble laisser beau-

coup à désirer : on la dirait imparfaite; mais, à mesure qu'on se l'assimile, *la Lumière* étonne et ravit par sa vérité, sa précision, sa netteté, et l'on est forcé de reconnaître qu'elle est en son genre un modèle incomparable de perfection.

Ce qui la spécifie et lui donne une supériorité incontestable, c'est son mode d'exposition, d'une transparence en quelque sorte infinie. Elle donne la vision intuitive des faits et plus encore de la raison des faits ou du mécanisme des phénomènes. Je croyais savoir l'Optique, que j'ai étudiée et rédigée sous toutes ses formes depuis trente ans; mais je suis forcé de reconnaître que je la sais incomparablement mieux depuis que j'ai traduit *la Lumière*. Les petites formules de M. Tyndall pénètrent beaucoup mieux au cœur des phénomènes que les plus savantes équations des Traités d'Optique mathématique.

Comme chefs-d'œuvre du genre je citerai la troisième Leçon, sur la polarité et la polarisation rectiligne, et la quatrième, sur la polarisation chromatique et les interférences. Jamais enseignement n'avait fait sur mon esprit un effet aussi extraordinaire. Non-seulement je voyais les phénomènes, mais je m'identifiais avec eux; ils n'étaient plus que des modifications de mon intelligence, ma propre pensée. La sensation que j'éprouvais alors était vraiment délicieuse. La vue intuitive des phénomènes, de leurs causes, de leur mécanisme est en effet le triomphe suprême de l'enseignement. Et voilà surtout à quel point de vue je recommande *la Lumière* de M. Tyndall comme le seul livre qui, à ma connaissance, initie pleinement aux mystères de l'Optique. Je voudrais le voir dans les mains de tous les amis de la Science. Elle n'est pas aussi profonde, aussi savante, aussi encyclopédique que *la Chaleur;* mais elle va bien plus directement au but et l'atteint plus complétement. J'ai fait d'ailleurs tout ce que j'ai pu pour que, sans avoir une couleur trop anglaise, ma traduction rendît parfaitement le texte original.

Me sera-t-il permis de faire remarquer que, dans son exposé de l'analyse spectrale, M. Tyndall fait la part vraiment trop belle à M. Kirchhoff? S'il est vrai que le célèbre physicien de Heidelberg

a fait, le premier, la chimie solaire, il n'est pas vrai au même degré qu'il ait fait le premier, par l'analyse spectrale, la chimie des substances terrestres. M. Tyndall parle bien de quelques précurseurs de M. Kirchhoff, mais il oublie les principaux, M. Plücker par exemple, qui apprit à MM. Kirchhoff et Bunsen à analyser par le prisme la lumière des flammes qu'ils s'efforçaient péniblement de résoudre dans ses principes constituants à l'aide de verres colorés ou absorbants. Le Mémoire de M. Kirchhoff a été lu à l'Académie de Berlin, le 27 octobre 1859; et neuf ans auparavant, comme sir William Thomson, le collègue et glorieux émule de M. Tyndall, a bien voulu le rappeler dans son discours inaugural de l'Association Britannique (Édimbourg, septembre 1871), je disais (*Répertoire d'Optique moderne,* publié en janvier 1860, t. III, p. 243) : « M. Foucault a publié une Note curieuse sur les spectres produits par les corps qui brûlent entre les deux pointes de charbon fixées aux pôles d'une forte pile. Nous avons répété ces belles expériences avec M. Soleil; nous pouvons même dire que nous leur avons donné un plus grand éclat, en projetant ces spectres sur un écran, sans leur rien faire perdre de leur splendeur. Dans la combustion de l'argent et du cuivre, il y a une raie verte qui surpasse en intensité les rayons les plus illuminés du spectre solaire. Le spectre du cuivre était facilement reconnu par ses raies vertes, celui du zinc par ses merveilleuses raies violettes. Dans la flamme du laiton, composé de cuivre et de zinc, on admirait les raies vertes du cuivre et les raies violettes du zinc; le maillechort a présenté des apparences beaucoup plus splendides : l'œil ne se lassait pas de contempler toutes les raies lumineuses des métaux qui entrent dans la composition de cet alliage multiple. AVEC UN PEU D'EXPÉRIENCE ON ARRIVE A FAIRE, PAR L'OBSERVATION DES RAIES, L'ANALYSE SINON QUANTITATIVE, DU MOINS QUALITATIVE des combinaisons les plus complexes de métaux très-dissemblables. »

Dans mon compte rendu d'une matinée scientifique donnée par M. Soleil et moi dans les salons de M. Émile de Girardin, en 1849, j'avais décrit ces mêmes expériences et affirmé plus nettement que

les spectres de radiation ou d'absorption de tous les corps de la nature avaient leurs raies sombres ou brillantes, caractéristiques et spécifiques de leur nature intime. Ma conviction à cet égard était si profonde, que je priai mon illustre maître A. Cauchy de formuler la théorie générale de ces raies. Il le fit dans une Note très-courte, mais très-explicite, publiée dans les *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences* et insérée en 1847 dans le second volume de mon *Répertoire d'Optique*, p. 238 et 239. Qu'il me soit permis de reproduire ici les quelques lignes qui la terminaient et qui n'ont pas été assez remarquées : « Observons encore que, l'état initial d'un système de molécules ou plutôt d'une portion de ce système étant arbitraire, le système d'ondes planes qui représente cet état initial, et qui s'en déduit par une formule connue, peut varier à l'infini comme cet état lui-même. Il en résulte que, parmi les ondes planes correspondant aux diverses longueurs d'ondulations, les unes doivent être très-sensibles, tandis que les autres peuvent l'être beaucoup moins et disparaître presque entièrement. On ne devra donc pas être surpris de voir, dans la théorie de la lumière, les rayons doués de réfrangibilités diverses, lorsqu'on les dispersera par le moyen du prisme, offrir des intensités variables non-seulement avec les longueurs d'ondulations correspondantes, mais encore avec la nature des corps dont ils émanent ou qu'ils traversent, et l'on devrait s'étonner, au contraire, qu'il en fût autrement. Ainsi doivent être évidemment expliquées les raies brillantes et obscures découvertes dans le spectre solaire et dans ceux que fournissent les autres corps lumineux. Les raies du spectre ne doivent pas nous surprendre : leur absence seule, dans le plus grand nombre des cas, serait inexplicable. » Voilà ce que nous écrivions en 1847. La chimie spectrale était donc à cette époque une vérité essentielle et incontestable : M. Kirchhoff n'avait donc pas à la créer. Cette affirmation ne ressortira pas moins d'une autre citation que je tiens à faire ici : M. Adolphe Erman, dans un Mémoire adressé à l'Académie des Sciences de Paris, en octobre 1844, sur les raies d'absorption du chlore, de l'iode et du brome,

disait en termes formels : « Il est étonnant que la théorie des phé-
» nomènes d'absorption (les phénomènes solaires expliqués par
» Kirchhoff sont des phénomènes d'absorption) ait encore fait si
» peu de progrès, puisque la marche des recherches qui doivent y
» conduire était nettement indiquée d'avance. Il me semble, en
» effet, que ces recherches doivent se borner : 1° à décomposer, à
» l'aide du prisme, la lumière sur laquelle l'absorption a agi ; 2° à
» caractériser les rayons qui ont été éteints par le seul moyen que
» l'Optique nous fournit pour cet effet, je veux dire par la mesure
» des longueurs d'ondes ; et 3° à voir si les longueurs d'ondes des
» rayons observés sont liées par quelques lois qui expliquent leur
» disparition. » C'est là évidemment toute l'analyse spectrale, plus complète qu'on ne l'a faite jusqu'ici. En dehors de ces vues théoriques, il y avait à découvrir le fait qu'une flamme arrête les ondes qu'elle peut elle-même engendrer, et la gloire de cette découverte est essentiellement française : elle appartient à M. Léon Foucault; M. Kirchhoff n'a fait que la formuler mieux et la généraliser. »

Il est dans *la Lumière* quelques passages hasardés que je ne puis laisser passer sans explications, précisément parce que, en les traduisant, j'en assume à un certain degré la responsabilité.

Page 9, ligne 11, M. Tyndall se fait l'écho d'une boutade humoristique d'une de ses plus grandes admirations, M. Helmholtz : « On pourrait en réalité dresser contre l'œil une longue liste d'accusations : son opacité, son défaut de symétrie, son manque d'achromatisme, sa cécité absolue ou partielle. Toutes ces raisons prises ensemble amenèrent M. Helmholtz à dire que, si un opticien lui livrait un instrument si plein de défauts, il se croirait autorisé à le renvoyer avec les reproches les plus sévères ». Sous cette forme, l'appréciation de l'œil est vraiment impardonnable. L'œil n'est pas essentiellement ou absolument achromatique : cela est vrai, cela même est nécessairement vrai, puisque aucune œuvre finie ne peut être infiniment parfaite et que la perfection absolue est le propre de l'être infini. Mais, par cela même qu'aucun homme n'a conscience de ce défaut d'achromatisme, qu'il faut, pour le mettre en évidence,

des expériences très-délicates faites avec de puissants instruments; qu'il ne modifie en rien pratiquement les couleurs des objets, l'œil est exactement ce qu'il doit être. On ne pourrait probablement faire disparaître ces imperfections inséparables de tout être créé et fini sans en faire naître d'autres beaucoup plus grandes. M. Helmholtz attribue le défaut d'achromatisme de l'œil au fait que la densité des milieux de l'œil ne surpasse guère la densité de l'eau. Or connaît-il assez la constitution de l'œil et les innombrables conditions qu'il doit remplir pour affirmer qu'une densité plus grande de ses milieux n'aurait pas des inconvénients très-graves, n'amènerait pas des épanchements ou des infiltrations? Je remercie M. Tyndall d'avoir opposé à ce jugement inconsidéré cette conclusion très-sage (page 9) : « Comme instrument pratique et en faisant entrer en ligne de compte les accommodements par lesquels ses défauts sont neutralisés, l'œil *n'en reste pas moins une merveille pour tout esprit capable de réflexion.* »

Page 132, M. Tyndall semble regarder comme fondée et insoluble l'objection faite à l'Église catholique, de prouver sa divinité ou son infaillibilité par l'authenticité de l'Écriture sainte, et d'affirmer l'authenticité et l'inspiration divine des saintes Écritures par l'autorité de l'Église infaillible, ce qui constituerait un cercle vicieux. On a prouvé, depuis bien longtemps, que ce cercle vicieux n'existe pas pour nous catholiques. En effet nous avons, indépendamment de toute citation des Écritures, par la tradition et la succession du ministère apostolique, la certitude de l'apostolicité de l'Église romaine, et aussi du fait que les apôtres ont donné aux églises qu'ils ont fondées tels ou tels livres, et non d'autres, comme Écriture sainte et parole de Dieu; en un mot nous prouvons, par la tradition non interrompue, l'authenticité et, par conséquent, l'inspiration des saintes Écritures, puis, par l'inspiration divine de l'Écriture, l'infaillibilité de l'Église. Ce n'est pas là un cercle vicieux, c'est, au contraire, à l'égard des protestants, qui admettent la divinité de l'Écriture sainte, *à priori,* au point de récuser toute autre preuve, un argument personnel. Ce sont les protestants qui

tombent, eux, dans un cercle vicieux, en prouvant la divinité de l'Écriture par une prétendue *persuasion intérieure* du Saint-Esprit, et se prétendent assurés de cette assistance par le témoignage des Écritures qui la leur promettent. Si M. Tyndall s'était interdit cette comparaison, je me serais de mon côté interdit cette observation que je regrette d'être forcé de consigner ici. *Non erat hic locus!*

Pages 112 et 113, M. Tyndall se hasarde à dire : « C'est par cet acte de cristallisation que la Nature se révèle d'abord à nous comme architecte. Où s'arrêteront ses opérations? continuera-t-elle, par le jeu des mêmes forces, à former des végétaux et des animaux? Quelle que puisse être la réponse à ces questions, croyez-moi, les notions des générations à venir, sur cette chose mystérieuse que quelques-uns appellent la matière brute, seront très-différentes de celles des générations passées. » C'est le germe de cette confession étrange qui lui est échappée dans son discours d'inauguration de Belfast : « Quand je prolonge ma vision en arrière, à travers les limites de l'évidence expérimentale, je discerne en cette matière, que, dans notre ignorance et sans le respect dû à son créateur, nous avons jusqu'ici couverte d'opprobres, *la promesse et la puissance d'engendrer toutes les formes et toutes les qualités de la vie.* » Nous avons expliqué cet écart d'un esprit très-élevé, par cette remarque bien simple, qu'après avoir perdu la notion du Dieu créateur, et fait la matière éternelle, il devait fatalement lui attribuer les propriétés et les facultés divines; et que, sans s'en douter, il rendait hommage au Dieu des Chrétiens, devenu pour lui le Dieu inconnu, *Ignoto Deo.*

Dans l'Appendice sur les rapports de la cristallisation avec la vie, M. Tyndall s'abandonne de nouveau à ses conceptions matérialistes, qui n'aboutissent, hélas! qu'à faire mieux comprendre que la vie est restée, pour cet esprit éminent, un mystère impénétrable. Il se complaît à la représenter comme le résultat des attractions et des répulsions polaires, dont il dote les atomes et les molécules des corps à la façon des aimants. Mais, même dans la vie de son arbre, il y a autre chose que des directions moléculaires,

effets de forces plutôt statiques que dynamiques : il y a mouvement et transport, qui supposent une force vive. J'aurais voulu qu'il eût placé le phénomène de la vie à côté des phénomènes de la sensation et de la pensée, dont il dit : « Le cerveau de l'homme lui-même est assurément un assemblage de molécules arrangées suivant des lois physiques ; mais, si vous me demandez de déduire de cette assemblage le plus petit des phénomènes de la sensation ou de la pensée, je me prosterne dans la poussière, et je reconnais l'impuissance humaine. Cette fois la spéculation étendrait ses ailes bien au delà de la région où il n'est plus de milieu capable de soutenir son vol. »

Sur le terrain purement scientifique, nul plus que moi n'admire en M. Tyndall le penseur original et profond, le maître éminemment habile ; mais, avec son esprit si éclairé et si élevé, il comprendra qu'en le combattant sur le terrain de la religion et de la métaphysique, j'use d'un droit légitime, je remplis un devoir sacré.

F. Moigno.

# PRÉFACE DE L'ÉDITION ANGLAISE.

Depuis mon retour des États-Unis, j'ai cherché par des corrections et des améliorations de diverses sortes à rendre ces Leçons plus utiles à mes lecteurs des deux côtés de l'Atlantique.

JOHN TYNDALL.

Royal Institution, juin 1873.

# PRÉFACE DE L'ÉDITION AMÉRICAINE.

Mon éminent ami, M. le Professeur Joseph Henry, de l'Institution Smythsonienne, m'avait fait l'honneur de prendre ces Leçons sous sa direction personnelle, et de fixer les temps et les lieux où elles seraient faites.

Croyant que les devoirs de ma profession à Londres pouvaient difficilement être suspendus pendant une longue période de temps, je ne devais pas m'attendre, au moment de mon départ, à voir ma visite aux États-Unis se prolonger au delà de la fin de 1872.

Ainsi limité pour le temps, M. le professeur Henry commença par le nord, et, descendant ensuite vers le sud, il décida que les Leçons seraient faites successivement à Boston, New-York, Philadelphie, Baltimore et Washington.

Par cet arrangement, que les circonstances et le temps rendirent inévitable, les Leçons à New-York auraient coïncidé avec la période de l'élection présidentielle; cela semblait très-inopportun, et, le fait m'étant signalé, j'offris de prolonger assez ma visite pour que les Leçons de New-York suivissent celles de Washington. Cette proposition fut cordialement acceptée par mes amis.

Pour moi personnellement, cet arrangement modifié s'est trouvé être un agrément et un profit : il me permit de prendre au pied de la chute du Niagara des vacances néces-

saires et délicieuses. Il eut, en outre, pour résultat d'imprimer aux étapes successives de ma mission le caractère d'une marche ascendante qui atteignit son point culminant à New-York et à Brooklyn.

Ma réception partout a été celle d'un ami par des amis, et maintenant que ma visite est devenue par la force des choses un événement passé, je me reporte vers elle en arrière, comme vers un souvenir sans aucun nuage, sans désagrément aucun. A l'exception d'un accident inexorable, il ne m'est rien arrivé que je n'eusse pas désiré de me voir arriver; et, depuis le commencement jusqu'à la fin, j'ai reçu du peuple américain des expressions de bienveillance que, pour ma part, je n'oublierai jamais. En réalité, bienveillance n'est pas le mot apte à rendre l'amabilité qui s'est manifestée à mon égard dans les États-Unis.

Pourquoi ne m'a-t-il pas été donné de répondre plus complétement aux désirs de mes amis et aux invitations qui m'étaient adressées par toutes les grandes villes de l'intérieur et de l'ouest! Mais le caractère de ces Leçons et le poids considérable de mon bagage d'optique expérimentale m'imposaient un si rude travail, que la nécessité du repos aurait suffi seule pour m'arrêter. En outre, chacun des paquebots-poste arrivés successivement de Londres m'apportait le remords du travail suspendu et du devoir négligé, par suite de mon absence.

L'Institution Royale possédait un Secrétaire honoraire, qui a voué à ses intérêts les meilleures années de sa vie professionnelle active, et l'énergie d'un homme vigoureux. Si quelque institution semblable peut être fondée ici, le vœu le plus cordial que je puisse former pour son succès, c'est qu'elle puisse être servie avec l'unité de but et l'amour toujours prêt au sacrifice que l'on trouve chez les directeurs

et les membres de Royal Institution, et plus intense, plus soutenu encore, chez M. le Dr Bence Jones. Mais lui, sur qui j'aurais pu me reposer, venait d'être abattu par une maladie cruelle ; et quoique mes autres collègues fussent très-désireux de m'aider de toutes les manières possibles, je ne pouvais conserver aucun doute sur le devoir que j'avais à remplir. Il fallait que je fusse à Londres. Je prie mes amis de l'intérieur et de l'ouest de prendre ces motifs en considération, et de me regarder non pas comme un homme insensible à leur amabilité, mais comme un homme qui, avec une ardeur comparable à la leur, aurait voulu remplir leurs désirs s'il l'avait pu.

Il est un autre point qui mérite quelque attention. En quittant l'Angleterre, je n'avais pas l'intention de publier ces Leçons, et, à part un ou deux fragments, rien n'était encore écrit quand j'arrivai ici. Depuis, pendant que j'enseignais à New-York, Brooklyn et New-Haven, les Leçons ont été écrites et imprimées. Sans doute que de nombreuses traces de la rapidité de leur rédaction se montreront çà et là, mais j'avais pensé que je devais à ceux qui les avaient écoutées avec une attention si infatigable, et aussi à ceux qui avaient tant désiré les entendre, sans l'avoir pu, de les leur laisser à mon départ sous une forme à peu près authentique. La constante application d'esprit que ce travail a rendue nécessaire m'a forcé de me faire étranger à beaucoup de plaisirs de société, il m'a empêché de m'initier moi-même au travail intérieur de diverses institutions pour lesquelles je me sentais un vif intérêt, et de me refuser à la généreuse hospitalité que m'offraient les clubs de New-York ; en un mot, elle m'a condamné à me poser en homme insociable. Mais, convaincu que les agréments de la société étaient incompatibles avec un travail acharné, je pris le

parti de me dévouer avec toute l'énergie dont j'étais capable, non à la seule société de mes intimes amis, mais à la société tout entière des États-Unis.

Dans la Leçon d'ouverture, j'ai énuméré les noms de ceux envers qui j'ai contracté une plus grosse dette de reconnaissance, pour l'aide empressée et souvent laborieuse pour eux qu'ils m'ont prêtée. Cette liste pourrait être très-étendue, car dans toutes les villes que j'ai visitées, j'ai trouvé sous la main des auxiliaires pleins de bonne volonté. Je ne dois pas cependant oublier le nom de M. Rhees, secrétaire particulier de M. le professeur Henry, qui, non-seulement à Washington, mais à Boston, m'a secondé de la manière la plus intelligente et la plus empressée. Je dois mes remercîments aux *Trustees* de l'Institut Cooper et aux directeurs de la librairie commerciale de Brooklyn. Qu'il me soit permis encore de payer une petite dette de reconnaissance à mon parent et ami, à l'esprit si élevé, le général Hector Tyndall, pour les soins si persévérants qu'il a pris de moi et pour la tendresse intelligente avec laquelle, lui et sa famille, ont adouci, pour moi et pour la famille de ce pauvre jeune homme, la douleur causée par la mort à Philadelphie de mon second assistant.

J'ai enfin à rendre hommage, avec les plus chaleureux éloges, à l'intégrité, l'activité, le dévouement avec lesquels, du commencement à la fin, j'ai été secondé par mon principal assistant, M. John Cottrell.

JOHN TYNDALL.

New-York, février 1873.

# SOMMAIRES DES LEÇONS.

## PREMIÈRE LEÇON.

Introduction, 1. — Emploi de l'expérience, 3. — Premières notions scientifiques, 4. — Sciences d'observation, 4. — Connaissances des anciens relatives à la lumière, 5. — La nature jugée par les théories défectueuses, 8. — Défauts de l'œil, 8. — Nos instruments, 9. — Propagation rectiligne de la lumière, 9. — Loi de l'incidence et de la réflexion, 11. — Stérilité du moyen âge, 13. — Réfraction, 15. — Découverte de Snell, 15. — Réflexion partielle et totale, 17. — Vitesse de la lumière, 21. — Rœmer, Bradley, Foucault et Fizeau, 21. — Principe de la moindre action, 24. — Descartes et l'arc-en-ciel, 25. — Expériences de Newton sur la composition de la lumière, 28. — Sa méprise en ce qui concerne l'achromatisme, 29. — Synthèse de la lumière blanche, 29. — Jaune et bleu, lumières produites par leur mélange, 31. — Couleurs des corps naturels, 33. — Les mélanges de pigments colorés contrastant avec les mélanges des lumières, 35.

## DEUXIÈME LEÇON.

Origine des théories physiques, 45. — But de l'imagination, 46. — Newton et la théorie de l'émission, 48. — Rectification des théories physiques, 51. — L'éther lumineux, 52. — Théorie ondulatoire de la lumière, 52. — Thomas Young, 53. — Fresnel et Arago, 55. — Conception de la notion des ondes, 56. — Interférence des ondes, 57. — Analogies du son et de la lumière, 62. — Manifestation du mouvement ondulatoire, 63. — Interférence des ondes du son, 64. — Manifestation optique, 65. — Ton et couleur, 66. — Longueurs d'onde de la lumière et vitesse de vibration des particules d'éther, 68. — Interférence de la lumière, 69. — Phénomènes qui suggérèrent d'abord la théorie des ondulations, 71. — Boyle et Hooke, 74. — Les couleurs des lames minces, 74. — La bulle de savon, 75. — Les anneaux de Newton, 79. — Théorie des accès, 82. — Explication qu'elle fournit des anneaux, 83. — Renversement de cette

théorie, 86. — Diffraction de la lumière, 87. — Couleurs produites par la diffraction, 89. — Couleurs de la nacre de perle, 100.

## TROISIÈME LEÇON.

Relation des théories avec l'expérience, 101. — Origine de la notion de l'attraction et de la gravitation, 102. — Notion de la polarité; comment elle est engendrée, 103. — Polarité atomique, 105. — Arrangements structuraux dus à la polarité, 107. — Architecture des cristaux considérée comme une introduction à leur action sur la lumière, 107. — Notion de la polarité atomique appliquée à la structure cristalline, 108. — Manifestations expérimentales, 110. — Cristallisation de l'eau, 113. — Expansion par la chaleur et par le froid, 114. — Manière dont l'eau se comporte étudiée et expliquée, 114. — Influence de la cristallisation sur les phénomènes optiques, 117. — Réfraction, 117. — Double réfraction, 119. — Polarisation, 122. — Action de la tourmaline, 123. — Caractères des rayons émergents du spath d'Islande, 127. — Polarisation par la réfraction ordinaire et la réflexion, 129. — Dépolarisation, 131.

## QUATRIÈME LEÇON.

Phénomènes chromatiques produits par les cristaux sur la lumière polarisée, 132. — Le prisme de Nicol, 135. — Polariseur et analyseur, 139. — Action du mica et des plaques minces de sélénite, 136. — Couleurs dépendant de l'épaisseur, 136. — Décomposition du rayon de lumière polarisée en deux autres par la sélénite, 140. — Un des deux est plus retardé que l'autre, 141. — Recomposition des deux systèmes d'ondes par l'analyseur, 141. — Interférence rendue ainsi possible, 143. — Production subséquente de couleurs, 143. — Action des corps mécaniquement étirés ou comprimés, 144. — Action des vibrations sonores, 148. — Action du verre dilaté ou comprimé par la chaleur, 146. — Polarisation circulaire, 151. — Phénomènes chromatiques engendrés par le quartz, 151. — Magnétisation de la lumière, 153. — Anneaux entourant les axes des cristaux, 156. — Cristaux uniaxes et biaxes, 157. — Aperçu de la théorie des ondulations, 159. — La couleur et la polarisation de la lumière du firmament, 161. — Génération de firmaments artificiels, 165.

## CINQUIÈME LEÇON.

L'échelle de la vision est incommensurable avec l'échelle de la radiation, 173. — Fluorescence, 175. — Rayons invisibles rendus visibles, 177.

— La vision n'est pas le seul sens auquel les faisceaux solaire et électrique font appel, 179. — Chaleur du faisceau lumineux, 180. — Combustion par le faisceau total au foyer des miroirs et des lentilles, 181. — Combustion à travers les lentilles, 182. — Ignition du diamant, 183. — Recherche des rayons qui sont efficaces dans cette ignition, 183. — Découverte, par William Herschel, des rayons solaires obscurs, 184. — Rayons invisibles base des rayons visibles, 185. — Les rayons invisibles séparés par un filtre-rayon des rayons visibles, 186. — Combustion au sein des foyers obscurs, 187. — Conversion des rayons de chaleur en rayons de lumière, 187. — Calorescence, 187. — Rôle joué dans la nature par les rayons obscurs, 188. — Identité de la lumière et de la chaleur rayonnante, 190. — Images invisibles, 193. — Réflexion, réfraction, polarisation rectiligne, dépolarisation, polarisation circulaire, double réfraction et magnétisation de la chaleur rayonnante, 193.

## SIXIÈME LEÇON.

Principes de l'analyse spectrale, 201. — Analyse prismatique de la lumière émise par les vapeurs incandescentes, 202. — Spectres discontinus, 202. — Preuves données par Bunsen et Kirchhoff que les raies sont caractéristiques des vapeurs, 204. — Découverte du rubidium, du cœsium et du thallium, 205. — Rapports de l'émission et de l'absorption, 205. — Les raies de Fraunhofer, 205. — Leur explication par Kirchhoff, 206. — Chimie solaire comprise dans cette explication, 208. — Expérience de Foucault, 210. — Principes de l'absorption, 210. — Analogies du son et de la lumière, 211. — Démonstration expérimentale de cette analogie, 212. — Applications récentes de la spectroscopie, 214.

## RÉSUMÉ ET CONCLUSION.

Développement successif de l'Optique, 219. — L'homme pratique et le savant, 224. — La science pure et ses applications, 227.

## APPENDICE.

Mesure des ondes de la lumière, 241. — Eau de cristallisation, 242. — Vie et cristallisation, 243. — Spectres de la lumière polarisée, p. 248. — Expériences de Foucault et de M. Fizeau, 251. — Bandes d'interférences dans le spectre, p. 253.

# LA LUMIÈRE.

## PREMIÈRE LEÇON.

Introduction. — Emploi de l'expérience. — Premières notions scientifiques. — Sciences d'observation. — Connaissances des anciens relatives à la lumière. — La nature jugée par les théories défectueuses. — Défauts de l'œil. — Nos instruments. — Propagation rectiligne de la lumière. — Loi de l'incidence et de la réflexion. — Stérilité du moyen âge. — Réfraction. — Découverte de Snell. — Réflexion partielle et totale. — Vitesse de la lumière. — Rœmer, Bradley, Foucault et Fizeau. — Principe de la moindre action. — Descartes et l'arc-en-ciel. — Expériences de Newton sur la composition de la lumière. — Sa méprise en ce qui concerne l'achromatisme. — Synthèse de la lumière blanche. — Jaune et bleu, lumières produites par leur mélange. — Couleurs des corps naturels. — Les mélanges de pigments colorés contrastant avec les mélanges de lumière.

Il y a quelque douze ans, je publiai en Angleterre un petit volume intitulé les *Glaciers des Alpes,* et une couple d'années après un second volume intitulé *la Chaleur, mode de mouvement.* Ces volumes furent suivis d'autres, écrits avec la même clarté et dans le même but de développer et de rendre plus profonde la sympathie entre la science et le monde en dehors d'elle. J'agissais d'accord avec les hommes intelligents et sérieux (1) qui pensent qu'il n'est bon pour aucun de ces deux mondes d'être isolés l'un

(1) Parmi ces hommes je ferai spécialement mention de feu sir Edmond Head, Baronnet, avec qui j'ai eu plusieurs conversations sur ce sujet.

de l'autre, ou antipathiques l'un à l'autre; et pour diminuer cet isolement, au moins dans un des départements de la science, je n'hésitai pas à faire trêve aux recherches originales qui avaient été jusqu'alors la poursuite et le plaisir de ma vie.

Les Ouvrages dont je parle ont été, pour la plus grande partie, réédités par M. Appleton, de New-York (1), sous les auspices d'un homme infatigable dans ses efforts pour la diffusion des connaissances scientifiques saines au sein du peuple des États-Unis, auquel son énergie, son habileté et sa préoccupation incessante dans la poursuite de son apostolat ont gagné les sympathies et le concours de beaucoup d'entre nous dans la *mère patrie :* je veux parler du professeur Youmans. Le but de ces Ouvrages fut compris et apprécié dans les États-Unis, tout aussi rapidement qu'en Angleterre, et ils m'apportèrent de ce côté de l'Atlantique d'innombrables preuves de sympathie bienveillante. Chaque année, je recevais (2) des invitations plus pressantes de visiter l'Amérique, et l'année dernière on me fit l'honneur d'une requête si cordiale, signée de vingt-cinq noms si distingués dans la science, la littérature et les positions administratives élevées, que je pris enfin la résolution d'y répondre, en bravant non-seulement les flots si inquiétants de l'Atlantique, mais l'épreuve beaucoup plus inquiétante encore d'apparaître en personne devant le public des États-Unis.

Cette invitation, qui me fut transmise par mon excellent

---

(1) Des mains duquel, je le dis avec un grand plaisir, j'ai toujours reçu un traitement honorable et libéral.

(2) Une des premières invitations m'arriva de M. John Amory Lowell, de Boston.

ami, M. le professeur Lesley, de Philadelphie, et précédée d'une proposition semblable de votre Nestor scientifique, le célèbre Joseph Henry, de Washington, exprimait le désir de me voir donner des leçons dans les principales cités de l'Union. Je consentis à le faire, quoiqu'il restât encore beaucoup d'obscurité dans mon esprit sur le sujet qu'il conviendrait de choisir. En réponse à mes demandes, cependant, on me donna à entendre qu'un cours de leçons destinées à montrer les avantages de l'expérience dans la culture des connaissances naturelles contribuerait matériellement à promouvoir l'éducation scientifique de cette contrée; et, bien que de semblables leçons imposent l'emploi d'instruments lourds et délicats, ainsi que leur transport de ville en ville, je résolus de répondre au désir de mes amis autant que le temps et les moyens à ma disposition me le permettraient.

Les expériences servent à deux grands usages : un usage de découverte et de vérification, un usage d'intuition; on les a définies, il y a bien longtemps, le langage adressé par le chercheur à la nature, langage auquel la nature fait une réponse intelligible. Ces réponses, il est vrai, arrivent au questionneur sous forme de murmures trop faibles pour être entendus de l'oreille du public; mais à la suite de celui qui a découvert vient le professeur, dont la fonction est de tant exalter et modifier les expériences de son prédécesseur, qu'il les rende aptes à une présentation en public. Cette fonction secondaire, je dois chercher dans le cas présent à la bien remplir.

Je me propose d'aborder un seul département de la philosophie naturelle, et de faire ressortir par son moyen le mode d'accroissement des connaissances scientifiques, sous le

guide de l'expérience. Je désire, dans cette première leçon, vous initier à certains phénomènes élémentaires, puis vous montrer comment les principes théoriques par lesquels ces phénomènes sont expliqués prennent racine et fleurissent dans l'esprit humain, et enfin appliquer ces principes au corps entier des connaissances comprises dans ces leçons. La science de la lumière se prête d'elle-même à ce mode d'enseignement : c'est donc à elle que je me propose d'emprunter les matériaux du présent cours. Il sera mieux de commencer par le petit nombre de faits simples connus des anciens, et de passer de ces faits, par une gradation historique, aux découvertes plus abstruses des temps modernes.

Toutes les notions que nous possédons de la nature, quelque exaltées et aussi quelque grotesques qu'elles soient, ont leur fondement dans l'expérience. La notion de volonté personnelle dans la nature n'a pas d'autre base. Dans la furie et la sérénité des phénomènes naturels, le sauvage voit le reflet de son humeur si variable, et il attribue naturellement ces phénomènes à des créatures ayant des passions semblables aux siennes, mais qui le surpassent beaucoup en puissance. Ainsi la notion de causalité, la conviction que les choses naturelles ne naissent pas d'elles-mêmes, mais qu'elles ont des antécédents, tient à la racine même de l'interprétation de la nature par les sauvages. De cette tendance invincible de l'esprit humain à chercher les antécédents des phénomènes a germé toute science.

Nous ne voulons pas maintenant revenir en arrière aux premiers tâtonnements de l'intelligence humaine ; encore moins voulons-nous entrer dans la question épineuse de l'origine de l'homme tâtonnant. Nous le prendrons à un certain stage de son développement, alors que, soit par évo-

lution, soit par un don soudain, il est entré en possession de l'appareil de la pensée et de la faculté d'en user. Pour un temps historiquement très-long, il fut limité à l'observation pure, acceptant ce que la nature lui offrait, et bornant à elle seule son action intellectuelle. Les mouvements apparents du Soleil et des étoiles attirèrent d'abord sur eux les questions de son intelligence; de cette manière, l'Astronomie fut la première science qui se développa; lentement et péniblement la notion des forces naturelles prit racine dans l'esprit humain. Aucune semblable notion, je dois le faire remarquer, n'est spontanément engendrée, et le germe de celle-ci fut l'observation actuelle des attractions et des répulsions électriques Lentement encore et difficilement la science de la Mécanique sortit à son tour de cette notion, et lentement enfin la pleine application des principes mécaniques aux mouvements des corps célestes. Nous traçons les progrès de l'Astronomie à travers Hipparche et Ptolémée; et, après une longue halte, à travers Galilée, Tycho-Brahé et Kepler, tandis que, du haut plateau de la pensée élevé par ces hommes célèbres, Newton s'élance comme un pic, abaissant ses regards sur tous les autres de son sommet culminant.

Mais d'autres objets que les mouvements des étoiles attirèrent l'attention de l'ancien monde. La lumière était un phénomène familier, et dès les temps les plus primitifs nous trouvons l'esprit de l'homme affairé dans ses efforts pour s'en rendre quelque peu compte; mais, sans l'expérience qui appartient aux derniers âges du développement scientifique, on ne peut faire que de très-petits progrès dans cette matière. Les anciens, par conséquent, réussirent beaucoup moins dans leur lutte avec la lumière

que dans leur lutte avec les mouvements solaires et stellaires. Cependant ils durent faire quelques progrès : ils s'assurèrent par eux-mêmes que la lumière se meut en ligne droite; ils savaient aussi que la lumière est réfléchie par les surfaces polies, et que l'angle de réflexion des rayons lumineux est égal à l'angle d'incidence. Ces deux résultats de la curiosité scientifique des anciens sont le point de départ de notre présent cours de leçons.

Mais, en premier lieu, il sera utile de dire quelques mots de la source de la lumière à laquelle nous aurons recours dans nos expériences. La rouille du fer est uniquement le résultat de sa combustion lente ; cette combustion développe de la chaleur, et si cette chaleur s'accumulait, il pourrait en résulter une température élevée. La destruction du premier câble atlantique fut due probablement à la chaleur développée de cette manière. D'autres métaux sont encore plus combustibles que le fer. Vous pouvez allumer des rognures de zinc à la flamme d'une bougie, et les faire brûler presque comme des rognures de papier. Mais nous avons d'abord à étendre notre définition de la combustion, en comprenant sous ce terme non-seulement la combustion dans l'air, mais aussi la combustion au sein des liquides. L'eau, par exemple, contient une provision d'oxygène qui peut s'unir au métal immergé dans son sein et le consumer ; c'est de cette sorte de combustion que nous ferons dériver la chaleur et la lumière dont nous ferons usage dans ce cours.

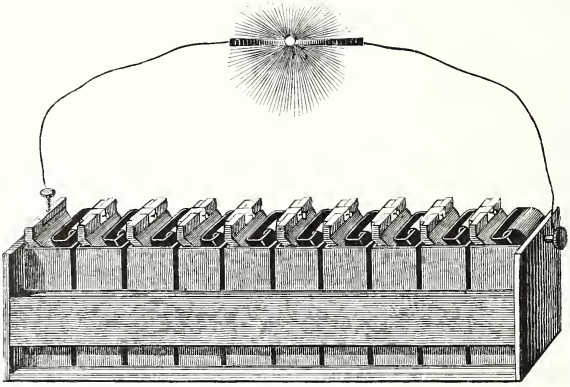
La génération de cette lumière et de cette chaleur mérite un moment d'attention. Devant vous est un instrument, une petite pile voltaïque, dans laquelle du zinc est immergé au sein d'un liquide convenable. Une force attractive s'exerce dans ce moment entre le métal et l'oxygène du liquide, et

l'on évite que leur union actuelle se fasse spontanément; mais, dès qu'on unit les deux extrémités par deux gros fils de cuivre, l'attraction est satisfaite, l'oxygène s'unit avec le métal, le zinc est consumé, et la chaleur, comme de coutume, est le résultat de cette combustion. Une puissance que, par défaut d'un meilleur nom, nous appellerons un *courant électrique*, passe en même temps à travers le fil. Coupons le gros fil de cuivre en deux, et unissons les extrémités séparées par un fil fin. Ce fil s'échauffe et brille d'une lumière blanche. D'où vient cette chaleur? La question est très-digne de réponse. Supposons en premier lieu que l'on emploie le gros fil, et qu'on laisse l'action se continuer jusqu'à ce que 100 grammes soient consumés; la quantité de chaleur engendrée dans la pile peut être exprimée numériquement d'une manière exacte. Laissons l'action se continuer encore, mais avec le fil fin, jusqu'à ce que 100 grammes de zinc soient de nouveau consumés. La quantité de chaleur engendrée dans la pile est-elle la même qu'auparavant? Non, elle sera moindre précisément de la quantité engendrée dans le fil fin, en dehors de la pile. De fait, en ajoutant la chaleur interne à la chaleur externe, nous obtenons pour la combustion de 100 grammes de zinc un total qui ne varie jamais. Nous avons ici un bel exemple de la loi de la constance qui préside aux énergies naturelles, loi dont la confirmation a été le plus beau couronnement de la philosophie scientifique moderne. Par cet arrangement, nous sommes donc capables de brûler notre zinc à distance. Nous pouvons, par exemple, avoir à New-York notre grille et notre combustible; la chaleur et la lumière de notre feu peuvent n'apparaître qu'à San-Francisco.

Détachant le fil fin, et attachant aux extrémités séparées des gros fils des bâtons de charbon de cornue, nous faisons

naître, en amenant les bâtons au contact, comme le montre la *fig.* 1, une petite étoile très-brillante. Cela posé, la lumière employée dans nos leçons n'est qu'une exagération de cette étoile. Au lieu d'être produite par dix auges ou dix éléments, elle est produite par cinquante. Placée au

Fig. 1.



sein d'une chambre ou lanterne convenable, transmise à travers des lentilles appropriées, cette source puissante nous fournira toute la lumière nécessaire à nos expériences.

Et ici, en passant, je me souviens de l'illusion commune que les œuvres de la nature, l'œil humain compris, sont théoriquement parfaites. L'œil a marché pendant de longs âges vers la perfection, mais il se peut qu'il ait encore devant lui de longs âges de perfectionnement à parcourir. Quand je regarde la lumière éblouissante de notre grande pile, je vois un globe lumineux, mais je ne puis pas voir du tout la forme des pointes de charbon de cornue d'où la lumière émane. Nous pouvons faire saisir clairement la cause de cet effet. Sur l'écran dressé devant vous se projette l'image des pointes de charbon, la surface entière de la lentille

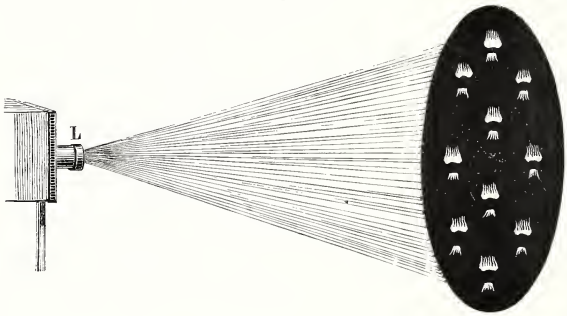
fixée à la face antérieure de la lanterne servant à former l'image ; elle n'est pas nette, elle est encore entourée d'un halo qui fait presque disparaître les charbons ; cela vient de l'imperfection de la lentille, appelée *aberration de sphéricité* et due à ce fait, que les rayons de la circonférence et du centre n'ont pas le même foyer. L'œil humain est sujet à un défaut semblable. Par cette cause et d'autres encore, il arrive que, si avec l'œil nu on regarde la lumière de cinquante éléments, la tache lumineuse projetée sur la rétine suffit à empêcher que l'image des pointes de charbon soit nettement définie. On pourrait, en réalité, dresser contre l'œil une longue liste d'accusations : son opacité, son défaut de symétrie, son manque d'achromatisme, sa cécité absolue ou partielle. Toutes ces raisons prises ensemble amenèrent Helmholtz à dire que, si un opticien lui livrait un instrument aussi plein de défauts, il se croirait autorisé à le renvoyer avec les reproches les plus sévères. Mais l'œil ne doit pas être jugé seulement au point de vue de la théorie ; il n'est pas parfait, je l'ai déjà dit, mais il est en voie de perfection. Comme instrument pratique, et en faisant entrer en ligne de compte les accommodements par lesquels ses défauts sont neutralisés, il n'en reste pas moins une merveille pour tout esprit capable de réflexion.

Les anciens, nous l'avons dit, connaissaient la propagation rectiligne de la lumière ; ils savaient qu'un corps opaque, placé entre l'œil et un point lumineux, interceptait la lumière de ce point. Il est possible que les termes *rayons* et *faisceaux* aient été suggérés par ces raies lumineuses rectilignes, qui, dans certains états de l'atmosphère, dardent du Soleil à son lever et à son coucher. La propagation en ligne droite de la lumière peut être expérimentalement montrée chez soi, en permettant à la lumière solaire d'entrer

par un petit trou percé dans le volet d'une fenètre, au sein d'une chambre dans laquelle on a dégagé un peu de fumée. Dans l'air pur vous ne pouvez pas voir le rayon; mais dans la fumée vous le pouvez, parce que la lumière qui passe invisible à travers l'air est diffusée et révélée par les particules de fumée à travers lesquelles le rayon poursuit sa course en ligne droite.

Vous pouvez aussi procéder de cette manière : faites un petit trou dans le volet fermé d'une fenètre, en face de laquelle se dresse un arbre ou une maison, et placez dans la chambre obscure, à quelque distance du trou, un écran blanc; chaque rayon rectiligne venu de la maison ou de l'arbre imprimera sa couleur sur l'écran, et l'ensemble de ces rayons sera, par conséquent, une image de l'objet. Mais, comme les rayons se croisent l'un l'autre à l'orifice, l'image sera renversée. Nous pouvons, ici, élucider et développer cette question de la manière suivante : en avant de notre lanterne se trouve une large ouverture dont nous avons enlevé la lentille L (*fig.* 2), et qui est

Fig. 2.

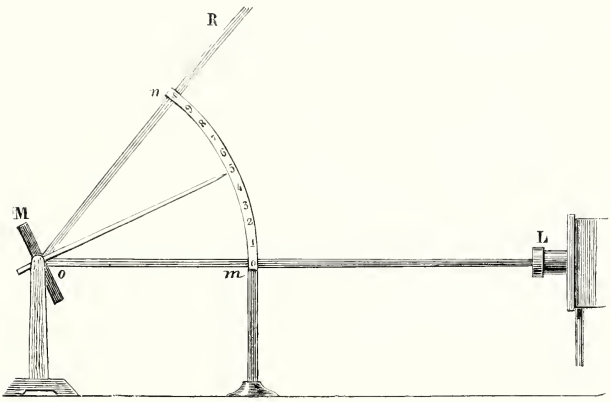



actuellement fermée par une feuille d'étain. Perçant, à l'aide d'une simple aiguille à coudre, un petit trou dans la

feuille d'étain, on voit se projeter sur l'écran une image renversée des pointes de charbon. Une douzaine de petits trous donneront une douzaine d'images; cent trous, mille trous donneront cent, mille images; mais, à mesure que les trous se rapprochent l'un de l'autre, c'est-à-dire à mesure que l'étain qui séparait les trous s'évanouit, les images empiètent de plus en plus l'une sur l'autre. Enlevant toute la feuille d'étain, l'écran se montre uniformément illuminé : par conséquent la lumière qui éclaire l'écran peut être regardée comme le résultat de l'empiétement des innombrables images des pointes de charbon. De la même manière, la lumière qui éclaire tout mur blanc par un jour sans nuage peut être regardée comme produite par la superposition des innombrables images du Soleil.

La loi que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence a sa raison dans une théorie que nous mentionne-

Fig. 3.




rons plus tard; il est seulement désirable ici que nous la mettions en évidence par l'expérience. Une simple latte ou règle droite, marquant 5 sur la *fig.* 3, fait office d'index

perpendiculaire à un miroir M capable de rotation. On reçoit d'abord sur le miroir un rayon de lumière que l'on renvoie en arrière, le long de la ligne d'incidence. Quoique les rayons incident et réfléchi passent dans des directions directement opposées, ils ne s'entre-choquent pas et ne se déplacent pas l'un l'autre. Si l'on fait tourner l'index L, le miroir tourne avec lui, et des deux côtés de l'index les rayons incident et réfléchi, L*o*, *o*R dessinent eux-mêmes leur trace sur la poussière de la chambre. La seule inspection des angles compris entre l'index et les deux faisceaux lumineux suffit pour montrer leur égalité. De petites balles élastiques tombant sur le miroir, dans la direction du rayon incident, suivraient la route du rayon réfléchi. Une carte dressée debout ou par sa tranche sur une table, sans inclinaison ou pente à droite ou à gauche, est dite perpendiculaire à la table. Dans le cas de la lumière, les rayons incident et réfléchi sont dans un plan perpendiculaire au miroir.

Cet appareil très-simple nous met à même de démontrer une autre loi, à savoir que, lorsque le miroir tourne, la vitesse angulaire du rayon réfléchi est deux fois celle du miroir réfléchissant. Une simple expérience rendra le fait saillant pour vous. L'arc *mn* (*fig.* 3) placé devant vous est divisé en dix parties; et, lorsque le rayon incident et l'index croisent le zéro de la graduation, le rayon incident et le rayon réfléchi sont horizontaux. Si l'on amène l'index du miroir à 1, le rayon réfléchi coupe l'arc à 2; si l'on amène l'index à 2, le rayon réfléchi va à 4; si l'index marque 4, le rayon coupe l'arc à 8; enfin, si l'index vient à 5, le rayon coupe l'arc à 10, comme l'indique la figure. Dans tous les cas, le rayon réfléchi se meut deux fois plus vite que le miroir.

Un des problèmes de la science, dont le progrès scientifique dépend surtout, est d'aider les sens de l'homme en leur faisant atteindre des régions qu'ils n'auraient jamais atteintes sans ce secours. Ainsi nous armons notre œil d'un télescope lorsque nous avons besoin de sonder les profondeurs de l'espace, et d'un microscope lorsque nous avons besoin d'explorer le mouvement et la forme dans leurs dimensions infiniment petites. Or cette loi de la réflexion angulaire, jointe à ce fait qu'un rayon de lumière ne pèse pas, nous fournit le moyen d'amplifier de petits mouvements dans un degré extraordinaire. Ainsi, en attachant un miroir à ses barreaux aimantés suspendus, et regardant sur ses règles divisées les images réfléchies par ses miroirs, le célèbre Gauss a pu découvrir les plus petits écarts dans la variation de la force magnétique de la Terre. Par un semblable arrangement, les faibles attractions et répulsions de la force magnétique ont été rendues manifestes. Les petits allongements d'une barre de métal par la seule chaleur de la main ont été assez amplifiés par cette méthode pour amener un index du plafond au parquet de cette salle. L'allongement d'une barre de fer dans l'acte de l'aimantation peut aussi être démontré par ce moyen. Helmholtz, il y a longtemps, s'est servi de cette méthode pour rendre évidentes à ses élèves les expériences classiques de du Bois-Raymond sur l'électricité animale ; enfin, dans le galvanomètre par réflexion de sir William Thomson, ce principe a reçu une de ses dernières applications.

Pendant plus de mille ans on ne fit en Optique aucun progrès en dehors ou au delà de cette loi. Des hommes du moyen âge, en effet, les uns s'efforçaient de développer les lois de l'univers *a priori*, d'après leur propre conscience,

tandis que beaucoup d'entre eux étaient si préoccupés de ce qui concerne le monde à venir, qu'ils regardaient d'un œil dédaigneux tout ce qui appartient à ce monde. Parlant de ceux qui de son temps cultivaient la Philosophie naturelle, Eusèbe dit : « Ce n'est pas par ignorance des choses admirées par eux, mais par le mépris du travail inutile qu'elles imposent, que nous nous occupons peu de ces matières, réservant l'activité de nos âmes pour des choses meilleures ». Lactance disait aussi : « Rechercher les causes des choses, se demander si le Soleil est aussi grand qu'il le paraît, si la Lune est convexe ou concave, si les étoiles sont fixées au firmament ou si elles flottent librement dans l'air, de quels matériaux sont formés les cieux et quelle est leur grandeur, s'ils sont en repos ou en mouvement, quelles sont les dimensions de la Terre, sur quels fondements elle est balancée ou suspendue : disputer ou conjecturer sur ces matières, ce serait absolument comme si nous choisissions pour sujet de discussion une ville d'une contrée lointaine, dont nous n'aurions jamais rien entendu que le nom (1). »

Pour ce qui regarde la réfraction de la lumière, le cours des recherches régulières fut repris en 1160, par un philosophe arabe nommé Alhazen. Elle fut ensuite étudiée

---

(1) On retrouve l'esprit de ces anciens héros de la foi jusque dans des régions inattendues. Dans le numéro d'avril de la *Contemporary Review*, après avoir décrit comment la science nouvelle est devenue ce qu'elle est, mon ami, M. le Dr Acland, met le langage suivant dans la bouche de l'évêque Wilson : « Ce qui me surprend, c'est que vous vous soyez donné tant de peine pour arriver à si peu. Vous méritez par cela les plus grands éloges qu'une créature raisonnable puisse désirer. Votre exactitude et la peine que vous prenez semblent prouver d'une manière irrécusable l'incertitude de quelques-unes de vos données et, par conséquent, la futilité de quelques-unes

par Roger Bacon, Vitellus et Kepler. Une des plus grandes occupations de la science est la détermination par des instruments précis des rapports de quantité des phénomènes, la valeur de ces mesures dépendant en grande partie de l'habileté et de la conscience de l'homme qui les prend. Vitellus semble avoir été à la fois ingénieux et consciencieux, tandis que Kepler s'était habitué à fouiller dans les observations de ses prédécesseurs, à les considérer sous tous les jours, pour en extraire en quelque sorte par distillation les principes qui les unissaient. Il a agi ainsi avec les mesures astronomiques de Tycho-Brahé, et il en a tiré les lois célèbres qui portent son nom. Il fit de même avec les mesures de réfraction de Vitellus; mais, dans ce cas, il ne réussit point; le principe, quoique très-simple, lui échappa, et il fut découvert d'abord par Willebrod Snell, vers l'année 1621.

Moins dans le but d'approfondir le phénomène en lui-même que de le présenter sous une forme qui vous fasse mieux comprendre plus tard le jeu de la pensée théorique dans l'esprit de Newton, on peut démontrer comme il suit le fait de la réfraction.

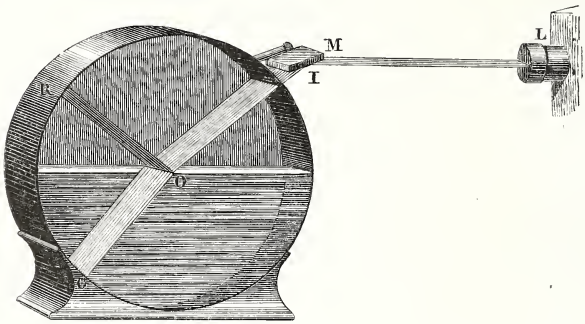
Je ne le ferai pas en traçant la marche du rayon par un dessin fait à la craie sur un tableau noir, mais en lui faisant dessiner lui-même sa trace brillante sous vos yeux. Un

---

de vos conclusions. Je sais d'ailleurs qu'en dépit de toutes vos peines vos sciences contiennent en elles-mêmes un si grand nombre d'exemples d'erreurs démontrées, que, hommes candides, vous devez souvent sentir glisser sous vos pieds le fond matériel qui leur sert de base. » Schelling exprime en ces termes son mépris des connaissances expérimentales : « L'*Optique* de Newton est l'exemple le plus frappant d'un édifice entier de tromperies, qui, dans toutes ses parties, est fondé sur l'observation et l'expérience. » On trouve toujours en Allemagne de petits imitateurs de Schelling.

vaisseau circulaire peu profond RIG (*fig.* 4), avec une paroi en verre, est rempli à moitié d'eau rendue trouble par son mélange avec un peu de miel ou l'addition d'un peu de mastic, et est dressé sur sa tranche avec sa paroi vitrée verticale. Au moyen d'un petit réflecteur M, et à travers la fente I, ménagée dans la bande circulaire qui entoure le vase, on fait pénétrer au sein du vase, dans une direction quelconque, un faisceau lumineux. Il tombe sur l'eau en O, y entre, et marque lui-même sa trace à travers le liquide, sous forme d'une bande brillante OG. En même temps, le

Fig. 4.



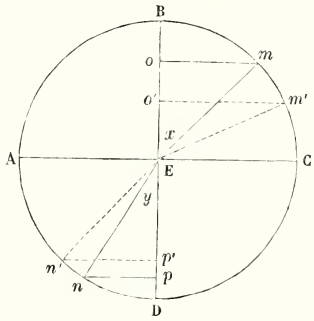

faisceau traverse invisible l'air situé au-dessus de l'eau, parce que l'air est impuissant à diffuser la lumière, mais une pincée de tabac projetée au sein de cet espace révèle aussitôt la trace du rayon incident. Si l'incidence est verticale, le rayon n'est pas réfracté ou ne dévie pas de sa course. Si elle est oblique, la réfraction à la surface commune de l'air et de l'eau, en O, est rendue clairement visible. On voit aussi que le long de OR la réflexion accompagne la réfraction, le rayon se divisant de lui-même, au point d'incidence, en deux portions, l'une réfractée OG, et l'autre réfléchie OR.

La loi par laquelle Snell lie entre elles les mesures

prises de son temps est celle-ci : admettons que ABCD (*fig.* 5) représente le profil de notre vase circulaire, et que AC soit la ligne de niveau de l'eau. Si le rayon est incident le long de BE perpendiculaire à AC, il n'y a pas de réfraction. S'il est incident le long de $m$E, il y a réfraction, il s'infléchit en E et vient percer le cercle en $n$. S'il tombe le long de $m'$E, il se réfracte encore et va percer le verre en $n'$.

Des extrémités des rayons incidents abaissez les perpendiculaires $mo$, $m'o'$ sur BD, et abaissez de même les perpendiculaires $pn$, $p'n'$ des extrémités des rayons réfractés. Mesurez les longueurs $om$, $pn$, et divisez l'un par l'autre les nombres qui les expriment, vous obtiendrez un certain

Fig. 5.




quotient. De la même manière, divisez $m'o'$ par la perpendiculaire correspondante $p'n'$, vous obtiendrez dans les deux cas le même quotient. Snell, de fait, trouva que ce quotient est une *quantité constante* pour chaque substance particulière, quoiqu'il varie en grandeur d'une substance à l'autre. Il appela ce quotient l'*indice de réfraction*.

Partout où la lumière tombe de l'air sur la surface d'un solide ou d'un liquide, plus généralement encore, partout où l'incidence a lieu d'un milieu moins réfractant ou ré-

fringent sur un milieu plus réfringent, la réfraction est *partielle*. Dans ce cas, la substance le plus puissamment réfringente transmet ou absorbe une portion de la lumière incidente. Sous l'incidence perpendiculaire l'eau réfléchit seulement 18 rayons sur 1000; le verre ne réfléchit que 25 rayons, tandis que le mercure en réfléchit 666. Si le rayon frappe la surface obliquement, la réflexion est augmentée. Sous une incidence de 40 degrés, par exemple, l'eau réfléchit 22 rayons, à 60 degrés elle en réfléchit 66, à 80 degrés 333, tandis qu'à 89°,5, où la lumière rase à peu près la surface, elle réfléchit 721 rayons sur chaque 1000. Ainsi, à mesure que l'obliquité augmente, la réflexion par l'eau approche de plus en plus de la réflexion par le mercure et finit par la surpasser; mais sous aucune incidence, quelque grande qu'elle soit, la réflexion à la surface de l'eau, du mercure ou de toute autre substance n'est *totale*.

Cependant la réflexion totale a lieu, et, dans le but de faire comprendre son application subséquente au prisme de Nicol, il est nécessaire d'établir quand elle a lieu. Ceci me conduit à l'énoncé d'un principe lié intimement à tous les phénomènes optiques, le principe de la réversibilité [1]. Dans le cas de la réfraction, par exemple, si le rayon passe obliquement de l'air dans l'eau, il s'infléchit du côté de la perpendiculaire, ou se rapproche de la perpendiculaire; s'il passe de l'eau dans l'air, il s'infléchit en sens opposé et s'éloigne de la perpendiculaire, revenant exactement sur ses pas. Ainsi, dans la *fig.* 5, si *m*E*n* est le chemin pris par

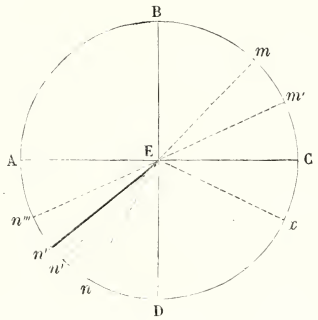
---

[1] De ce principe, sir John Herschel déduit, d'une manière à la fois simple et élégante, la loi fondamentale de la réfraction. (Voyez *Familiar Lectures*, p. 236.)

un rayon passant de l'air dans l'eau, $n$E$m$ sera sa route dans son passage de l'eau dans l'air.

Supposons que la lumière, au lieu d'être incidente le long de $m$E ou $m'$E, soit incidente, autant que possible, le long de CE (*fig.* 6); supposons, en d'autres termes, qu'elle rase

Fig. 6.




juste la surface avant d'entrer dans l'eau : après la réfraction, elle poursuivra sa course suivant E$n''$ ; réciproquement, si la lumière part de $n''$ et tombe en E, en s'échappant dans l'air, elle rasera juste la surface de l'eau. Mais une question surgit ici naturellement : qu'arrivera-t-il si l'on suppose que le rayon venant de l'eau suive le chemin $n'''$E, au delà de $n''$E? La réponse est : il ne quittera pas du tout l'eau, et il sera réfléchi totalement le long de E$x$. De plus, à la surface intérieure de l'eau, la loi est juste la même qu'à la surface supérieure; l'angle d'incidence DE$n'''$ est aussi égal à l'angle de réflexion DE$x$.

La réflexion totale peut être mise en évidence simplement comme il suit : placez une pièce de 1 franc dans un vase à boire, et inclinez le verre de telle sorte que la lumière venue de la pièce tombe avec l'obliquité nécessaire sur la surface de l'eau placée au-dessus d'elle. Regardez d'en bas vers cette

surface, et vous verrez l'image de la pièce y briller aussi vivement que si c'était la pièce elle-même. Plongez le bout fermé d'un tube éprouvette en verre dans l'eau, et inclinez le tube. Si l'inclinaison est suffisante, la lumière qui tombe horizontalement sur le tube ne peut pas entrer dans l'air qui remplit son intérieur, mais elle est totalement réfléchie en haut. Regardé en bas, un semblable tube se montre aussi brillant que de l'argent bruni. Versez un peu d'eau dans le tube ; à mesure que le niveau du liquide s'élève, la réflexion totale s'éteint, et avec elle le lustre, qui se réduit graduellement à une zone de plus en plus étroite, et disparaît complétement lorsque le niveau de l'eau au sein du tube atteint le niveau de l'eau au dehors. Tout tube dont l'extrémité est hermétiquement fermée à l'eau produira cet effet à la fois très-beau et très-instructif.

La réflexion totale ne se produit jamais, excepté lorsqu'un rayon essaye de passer d'un milieu plus réfringent dans un milieu moins réfringent ; mais, dans ce cas, elle se produit toujours quand l'obliquité est suffisante. Le mirage du désert et d'autres phénomènes optiques de l'atmosphère lui sont dus en partie. Si, par exemple, le Soleil frappe une nappe de sable, la couche d'air en contact avec le sable devient plus légère et moins réfringente que l'air au-dessus d'elle ; par conséquent, les rayons des objets distants, tombant très-obliquement sur la couche échauffée, sont quelquefois totalement réfléchis en haut, produisant ainsi des images semblables à celles produites par l'eau. J'ai vu l'image renversée d'une roche appelée Mont-Tombelaine, sur le sable échauffé de la Normandie, près d'Avranches. Ce furent ces apparences décevantes qui condamnèrent, pendant un temps quelquefois assez long, l'armée française en Égypte au supplice de Tantale.

L'angle qui marque la limite au delà de laquelle la réflexion totale se produit s'appelle l'*angle limite;* il est indiqué dans la *fig.* 6 par la forte ligne E$n''$. Il doit évidemment diminuer à mesure que l'indice de réfraction croît. Pour l'eau, il est de 48° 45′, pour le flint-glass de 38° 41′, et pour le diamant de 23° 42′. Ainsi, toute la lumière incidente de deux quadrants entiers, ou de 180 degrés, dans le cas du diamant, est condensée par la réfraction dans un espace angulaire de 47° 22′, le double de 23° 42′. Le grand pouvoir dispersif et le grand pouvoir réfléchissant s'unissent donc dans le diamant à sa réfraction très-grande : de là son éclat excessif, tant pour la lumière blanche que pour la lumière prismatique ou colorée (1).

En 1676, une impulsion nouvelle fut donnée à l'Optique par l'Astronomie. Cette année-là, Olaus Rœmer, un savant danois, était occupé, dans l'Observatoire de Paris, à observer les éclipses des satellites de Jupiter. La planète, dont la distance au Soleil est de 776 millions de kilomètres, a quatre satellites : nous ne nous occuperons ici que de celui qui est le plus près de la planète. Rœmer vit le satellite continuer sa rotation sur la surface de la planète, passer de l'autre côté, et se plonger alors dans l'ombre de Jupiter, se comportant comme une lampe qui s'éteint soudainement;

---

(1) Relativement à la réflexion totale de la lumière au sein d'un jet d'eau, alors que le jet brille comme de la lave fondue qui coule, on est en droit de se demander, puisque la réflexion est totale ou intérieure, comment on voit le jet. Si l'eau était pure, je crois que le jet ne pourrait pas être vu : la lumière, comme le dit Emerson, *se cache elle-même dans sa transparence;* le jet est vu comme l'est notre faisceau lumineux dans les expériences sur la réfraction (*fig.* 4), par la diffusion de la lumière due à des particules mécaniquement suspendues.

au second bord de l'ombre, il le vit reparaître comme une lampe qui se rallume tout à coup. L'astre jouait ainsi pour l'astronome le rôle d'un signal de nuit, et lui permettait de fixer exactement le temps de la révolution. La période entre les deux allumages successifs de la lampe satellitaire fut trouvée égale à quarante-deux heures vingt-huit minutes et trente-cinq secondes.

Cette mesure de temps était si exacte, qu'après avoir déterminé le moment auquel le satellite émergeait de l'ombre, l'instant de sa centième réapparition pouvait être aussi déterminé. Elle se faisait exactement 100 fois quarante-deux heures vingt-huit minutes trente-huit secondes après la première observation.

La première observation de Rœmer fut faite lorsque la Terre était au point de son orbite le plus rapproché de Jupiter. Six mois après, la Terre étant au point opposé de son orbite, alors que la petite lune devait avoir fait sa centième réapparition, on s'aperçut qu'elle n'était pas fidèle au rendez-vous; elle se trouva de quinze minutes en retard sur le temps calculé. Sa réapparition, en outre, avait lieu de plus en plus tard, à mesure que la Terre avançait vers les régions de son orbite plus distantes de Jupiter. Rœmer raisonnait ainsi : « Si j'avais pu rester de l'autre côté de l'orbite, le satellite aurait toujours reparu au moment précis; un observateur placé là aurait probablement vu le satellite quinze minutes plus tôt; le retard, dans mon cas, est donc dû à ce fait, que la lumière exige quinze minutes pour aller de la place où ma première observation a été faite à ma position actuelle. »

Cet éclair de génie fut immédiatement suivi d'un autre. « Si ce soupçon est fondé, continuait Rœmer, alors que j'approche de Jupiter, de l'autre côté de l'orbite de la Terre, le retard doit devenir graduellement moindre, et,

lorsque j'atteindrai le lieu de ma première observation, il n'y aura plus de retard du tout. Il trouva que c'était bien ce qui arrivait; il ne prouva pas ainsi seulement que la lumière emploie du temps pour traverser l'espace, il détermina en outre la vitesse de cette propagation.

La vitesse de la lumière, déterminée par Rœmer, est de 327 000 kilomètres par seconde.

Pendant quelque temps, cependant, les observations et les raisonnements de Rœmer ne réussirent point à produire la conviction. Ils furent révoqués en doute par Cassini, Fontenelle et Hooke; plus tard vint la confirmation inattendue de la découverte de Rœmer par l'astronome anglais Bradley. Il remarqua que les étoiles fixes ne semblent pas être fixes en réalité, et que tous les ans elles décrivent une petite orbite dans le ciel. Ce résultat le rendit perplexe; mais Bradley avait un esprit ouvert aux conjectures, et capable de voir dans le plus petit fait une image des plus grandioses. Il se trouvait un jour en bateau sur la Tamise, et remarqua qu'aussi longtemps qu'il continuait sa course en ligne droite, la flamme flottant au sommet de son mât montrait le vent soufflant toujours dans la même direction, mais que le vent semblait varier aussi souvent que le bateau changeait de direction. Là, dit Wheweel, *était l'image du grand fait observé par Bradley* : le bateau était la Terre se mouvant dans son orbite, le vent était la lumière venue des étoiles.

Nous pouvons nous demander, en passant, ce que, sans la faculté qui permettait de concevoir une telle image, eussent été le vent et la flamme de Bradley : un vent et une flamme, rien de plus. Vous allez comprendre immédiatement la signification de la découverte de Bradley : figurez-vous que vous êtes dans un train de chemin de fer en repos, sous une

averse de pluie tombant verticalement. Au moment où le train se met en marche, les gouttes de pluie commencent à tomber obliquement, et l'obliquité est d'autant plus grande que la marche du train est plus rapide. D'une manière parfaitement semblable, les rayons venus verticalement d'une étoile à notre œil sont rendus inclinés ou obliques par le mouvement de la Terre à travers l'espace. Connaissant la vitesse du train et l'obliquité de la pluie qui tombe, on peut calculer la vitesse de chute des gouttes ; de même, connaissant la vitesse de la Terre dans son orbite et l'obliquité des rayons dus à cette cause, nous pouvons calculer tout aussi facilement la vitesse de la lumière. Bradley fit le calcul, et l'*aberration de la lumière*, c'est ainsi qu'on appela sa découverte, lui permit d'assigner à la vitesse de la lumière une valeur presque identique avec celle que Rœmer avait déduite d'une méthode d'observation totalement différente. Plus tard M. Fizeau, mettant en jeu non plus des distances planétaires ou stellaires, mais simplement la largeur de Paris, détermina cette même vitesse ; enfin, après lui, M. Foucault, savant doué d'un génie mécanique très-rare, résolut le problème sans quitter son cabinet de travail. Par suite d'une erreur dans la détermination de la distance de la Terre au Soleil, la vitesse assignée à la lumière par Rœmer et Bradley est trop grande. On peut la regarder, avec une approximation très-grande, comme égale à 298000 kilomètres.

Grâce à la découverte de Rœmer, l'idée conçue par Descartes, et épousée par Hooke, que la lumière se propage instantanément à travers l'espace, fut à jamais abandonnée ; mais la détermination de sa vitesse à travers l'espace conduisit à des spéculations sur sa vitesse à travers les milieux transparents terrestres. L'indice de réfraction d'un rayon passant de l'air dans l'eau est $\frac{4}{3}$ ; dans la pensée de Newton

la signification de ces nombres était que, si la vitesse de la lumière dans l'eau est 4, sa vitesse dans l'air sera 3, et il déduisit de cete hypothèse les phénomènes de la réfraction. Depuis il a été prouvé que c'est le contraire qui est vrai, c'est-à-dire que, la vitesse de la lumière dans l'eau étant 3, sa vitesse dans l'air est 4 ; mais, au temps de Newton, comme au nôtre, un même grand principe déterminait et détermine la marche de la lumière dans tous les cas. En passant d'un point à un autre, quels que soient les milieux interposés sur son chemin, ou de quelque manière qu'elle soit réfléchie, la lumière suit la route qui *exige le moins de temps*. Ainsi (*fig.* 4), quand on tient compte des vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau, la lumière ira de G en I plus rapidement, en venant d'abord en O, et changeant là de route, que si elle avait marché en ligne droite de G en I. Cela est facile à comprendre, puisque dans le second cas elle parcourt une trop grande distance dans l'eau, qui est le milieu le plus retardant.

La loi de la réfraction de Snell est une des pierres angulaires de la science optique, et ses applications aujourd'hui se comptent par millions. Immédiatement après sa découverte, Descartes l'appliqua à l'explication de l'arc-en-ciel. Un rayon de lumière solaire, tombant obliquement sur une goutte d'eau, est réfracté et entre dans la goutte ; il est en partie réfléchi à la surface intérieure de la goutte, ou face de sortie, et de nouveau réfracté à son émergence. Par ces deux réfractions, à son entrée et à sa sortie, le faisceau lumineux est décomposé et quitte la goutte résolu ou séparé en ses constituants colorés. Ainsi décomposée, la lumière atteint l'œil de l'observateur qui fait face à la goutte et tourne le dos au Soleil.

Concevons une ligne droite menée du Soleil à l'œil de

l'observateur, et prolongée au delà. Concevons une seconde ligne, qui fasse un angle de 42°,5 avec la ligne menée du Soleil à l'œil et prolongée jusqu'à l'averse de pluie. Le long de cette seconde ligne, à son extrémité éloignée, la goutte de pluie, si elle est frappée par le rayon du Soleil, enverra à l'œil un rayon de lumière rouge. Toute autre goutte semblablement placée, c'est-à-dire toute goutte située à une distance angulaire, égale à 42°,5, de la première ligne en question, fera de même. Il se forme ainsi une bande circulaire de lumière rouge : on peut la regarder comme une portion de la base d'un cône ayant les rayons qui dessinent la bande pour enveloppe, et son sommet dans l'œil de l'observateur. A cause de la grandeur du Soleil, la largeur angulaire de cette bande rouge sera d'un demi-degré.

Concevons que de l'œil de l'observateur on mène une autre ligne faisant un angle, non plus de 42° 5, mais de 40°,5, avec la ligne menée de l'œil au Soleil. Le long de cette ligne, tout rayon de lumière qui rencontrera une goutte enverra à l'œil de la lumière violette. Toutes les gouttes situées à la même distance angulaire feront de même, et nous obtiendrons ainsi une bande de lumière violette de la même largeur que la bande de lumière rouge; ces deux bandes constitueront les couleurs limites de l'arc-en-ciel, et comprendront entre elles les bandes correspondant aux autres couleurs. Ainsi la ligne menée de l'œil de l'observateur au *milieu* de l'arc et la ligne menée par l'observateur au Soleil comprennent toujours un angle de 41 degrés; expliquer pourquoi il en est ainsi était la grande difficulté restée insoluble jusqu'au temps de Descartes.

Prenant la plume, et calculant par la loi de Snell la marche de chaque rayon coloré à travers la goutte de pluie, Descartes trouva que, sous un angle d'incidence parti-

culier, les rayons émergeaient de la goutte *à peu près parallèles entre eux*. Ils étaient, par là même, aptes à garder leur intensité à travers une longue distance atmosphérique. Sous tout autre angle, les rayons quittaient la goutte *divergents,* et, en raison de cette divergence, ils arrivaient à l'œil si affaiblis, qu'ils étaient pratiquement perdus pour lui. L'angle de parallélisme dont il est ici question était précisément l'angle de 41 degrés que l'observation nous montre invariablement associé avec l'arc-en-ciel.

Et ici nous devons consacrer quelques instants à une question qui a été souvent le sujet de discussions publiques, à savoir si l'arc-en-ciel qui s'étend sur une nappe d'eau tranquille est jamais vu réfléchi dans l'eau. Supposons que vous coupiez dans du carton une bande circulaire de la largeur apparente de l'arc-en-ciel, et que vous la peigniez des couleurs de l'arc-en-ciel, une semblable bande étendue sur une eau tranquille devra, si elle n'est pas trop distante, être vue indubitablement réfléchie dans l'eau. Les rayons colorés d'une semblable bande seront émis dans toutes les directions; ceux qui frapperont l'eau sous l'angle convenable seront réfléchis à l'œil, et lui apporteront l'image de la bande ; mais les rayons efficaces dans l'arc-en-ciel seront émis seulement dans la direction déterminée par 41 degrés ; les rayons, par conséquent, qui sont envoyés par les gouttes à la surface de l'eau, ne porteront pas avec eux la condition nécessaire au parallélisme, et par suite, quoique le nuage sur lequel se peint l'arc-en-ciel puisse être réfléchi par l'eau, nous n'aurons pas de réflexion de l'arc lui-même.

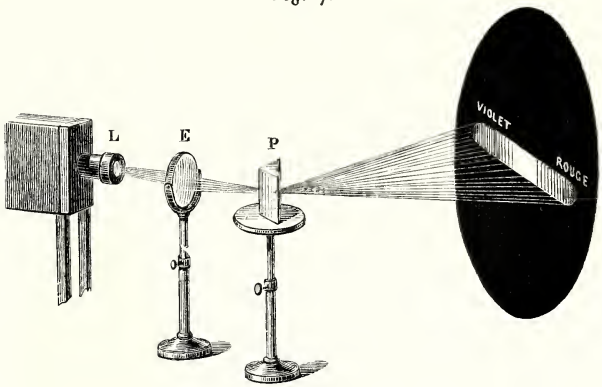
L'arc-en-ciel a introduit un phénomène nouveau, le phénomène de la couleur, et nous arrivons ainsi à l'un de ces points de l'histoire des sciences où les travaux des

grands hommes s'entre-mêlent tant, qu'il devient très-difficile d'assigner à chaque travailleur sa part précise d'honneur. Descartes avait touché le seuil de la découverte de la décomposition de la lumière, mais l'énoncé formel de sa vraie loi était réservé à Newton. Il débuta ainsi dans son travail. Dans le volet fermé d'une croisée il perça un orifice, et laissa un mince filet de lumière passer par cet orifice. Le faisceau dessinait une image blanche et ronde du Soleil sur le mur opposé de la chambre. Sur le chemin de ce faisceau, Newton plaça un prisme, dans l'espérance de voir le rayon réfracté, mais aussi dans l'espoir de voir l'image du Soleil ronde encore après la réflexion. A son grand étonnement, le Soleil dessina une image dont la longueur était égale à cinq fois la largeur. En outre, elle n'était plus blanche, mais divisée en bandes de diverses couleurs. Newton vit immédiatement que la lumière du Soleil était composée et non simple. Son image allongée lui révéla le fait que quelques-uns des constituants de la lumière sont plus déviés par le prisme que les autres, et il en conclut que, par conséquent, la lumière blanche du Soleil est un mélange de lumières de couleurs différentes et de degrés différents de réfrangibilité.

Répétons cette célèbre expérience : vous voyez maintenant dessiné sur l'écran un disque lumineux qui sera pour nous l'image du Soleil de Newton. En faisant passer le faisceau venu de L (*fig.* 7), et qui produit le disque, d'abord à travers une lentille, qui nous donne une image nette de l'ouverture, puis à travers un prisme P, nous obtenons l'image colorée de Newton, avec ses extrémités rouges et violettes, image qu'il appela un *spectre*. Newton divisa le spectre en sept parties, rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet, qu'on appelle communément les sept cou-

leurs primitives ou principales du spectre. La séparation de la lumière blanche en ses couleurs constituantes est ce qu'on appelle la *dispersion*.

Fig. 7.

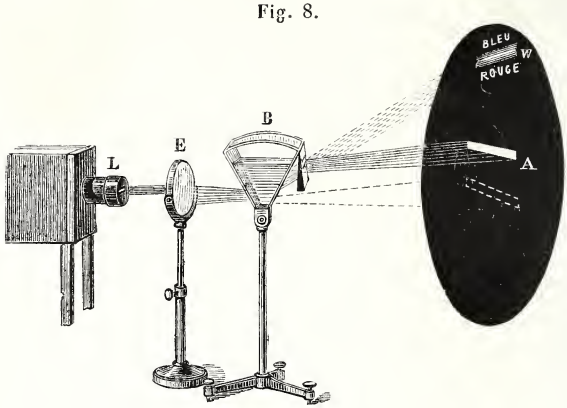



Ce fut la première *analyse* de la lumière solaire par Newton ; mais l'esprit scientifique est avide de vérifications, et il ne les néglige pas quand elles sont possibles. Newton compléta sa preuve par la *synthèse* de cette manière : le spectre qui est sous vos yeux est formé par un prisme de verre ; faisons passer le rayon décomposé à travers un second prisme, mais renversé ou placé de telle sorte que les couleurs, une seconde fois réfractées, soient réunies de nouveau : le disque lumineux parfaitement blanc est restauré.

Dans ce cas, la réfraction et la dispersion sont abolies à la fois. En est-il toujours de même ? Pouvons-nous avoir l'une sans l'autre ? La conclusion de Newton fut qu'on ne le pouvait pas. En cela il se trompait, et cette erreur, qu'il a soutenue jusqu'à la fin de sa vie, retarda le progrès des découvertes optiques. Dollond prouva plus tard qu'en prenant deux verres de nature différente on pouvait éteindre

les couleurs, tout en laissant un résidu de réfraction, et il utilisa ce résidu de réfraction dans la construction de lentilles achromatiques, ou lentilles ne donnant point de couleurs, que Newton avait pensées être impossibles. En plaçant un prisme d'eau, eau contenue dans un vase en forme de coin avec des parois en verre B (*fig.* 8), en opposition avec un prisme en flint-glass, placé à la droite de B, nous pouvons reproduire ce fait sous vos yeux.

Fig. 8.




Nous avons en premier lieu sur l'écran la position, indiquée par une ligne ponctuée, du faisceau non réfracté ; nous produisons ensuite le spectre étroit de l'eau W ; enfin, en introduisant un prisme en flint-glass, nous réfractons le rayon de nouveau, jusqu'à ce que toute couleur disparaisse en A. L'image de la fente est maintenant blanche, et vous voyez que, quoique la dispersion soit détruite, il reste une quantité sensible de réfraction.

C'est ici le lieu d'éclaircir un autre point relatif aux moyens instrumentaux employés dans ces leçons. Les corps diffèrent considérablement entre eux, quant à leur pouvoir

de réfraction et de dispersion. Notez la position du spectre de l'eau sur l'écran : sans altérer en aucune façon la forme du vase prismatique, substituons simplement à l'eau le bisulfure de carbone transparent, et vous remarquerez combien plus haut le rayon est projeté, combien plus riche est le déploiement des couleurs. Pour augmenter les dimensions de notre spectre, nous avons employé cette fois une fente L, au lieu d'une ouverture circulaire (1).

La synthèse de la lumière blanche peut être effectuée de trois manières, qui sont maintenant dignes d'attention : ici d'abord nous avons un spectre très-riche, produit par la décomposition du faisceau venu de L (*fig.* 9). Une des faces du prisme P est protégée par un diaphragme que l'on ne voit pas dans la figure, et qui est percé d'une fente longitudinale par laquelle le faisceau entre dans l'intérieur du prisme. Il émerge décomposé par l'autre face. Je fais passer les couleurs à travers une lentille cylindrique C, qui les serre assez les unes contre les autres pour produire sur l'écran une image rectangulaire nettement définie de la

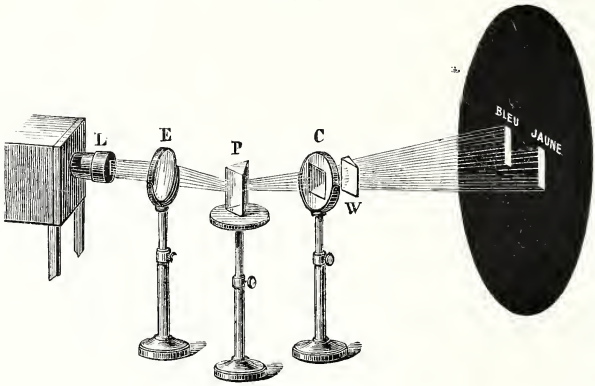
---

(1) La faible dispersion de l'eau masque, comme Helmholtz l'a fait remarquer, le défaut d'achromatisme de l'œil. A nu, je puis voir nettement défini un disque bleu situé à distance, mais non un disque rouge. Je puis aussi voir nettement définis à son extrémité bleue les bords limites, inférieur et supérieur, d'un spectre réfracté horizontalement; mais nous les voyons mal définis à l'extrémité rouge.

Je projette un disque lumineux sur un écran, et je couvre l'une des moitiés de l'ouverture avec un verre rouge, l'autre avec un verre vert. La différence entre les dimensions des deux est pour mon œil, et pour l'œil de beaucoup d'autres. extraordinaire. Pour plusieurs personnes même, les dimensions apparentes des deux demi-cercles sont inverses. Si, avec une lorgnette, je corrige la dispersion de la lumière rouge sur la rétine, alors le bleu cesse de donner une image nettement définie. Ainsi examiné, le défaut d'achromatisme de l'œil apparaît réellement très-grand.

fente longitudinale (cette image sur la figure est droit en face de la fente). Les couleurs se sont superposées de nouveau et vous voyez un blanc pur. Entre le prisme et la lentille cylindrique on peut voir les couleurs dessinant elles-mêmes leurs traces sur la poussière de la salle. Quand on supprime à l'aide d'une carte les bandes moins réfrangibles, le rectangle se montre bleu. A l'aide d'un prisme de verre

Fig. 9.




très-mince W, on peut faire dévier une portion des couleurs, et laisser les autres portions. On voit maintenant sur l'écran deux rectangles colorés produits de cette manière : ils sont teints de couleurs complémentaires, couleurs qui, par leur fusion, produisent du blanc. Remarquons que, par une manipulation judicieuse, une de ces couleurs peut être rendue jaune et l'autre bleue. Je retire le prisme, le jaune et le bleu se mêlent immédiatement, et nous avons du blanc pour résultat de leur union. Et voici qu'en passant nous faisons justice d'une fausseté d'abord signalée par Helmholtz, que le mélange des lumières bleue et jaune produit du vert.

Rétablissant l'ouverture circulaire, nous obtenons une fois de plus un spectre semblable à celui de Newton. Au moyen d'une lentille, nous rassemblons toutes ces couleurs et nous leur faisons former non une image de l'ouverture, mais une image des pointes de charbon elles-mêmes.

Enfin, en vertu de la persistance des impressions sur la rétine, au moyen d'un disque en rotation, sur lequel sont appliquées dans des secteurs séparés les couleurs du spectre, nous les superposons de nouveau pour l'œil, et nous produisons encore l'impression de la blancheur.

Après avoir démêlé les constituants enchevêtrés de la lumière blanche, nous avons maintenant à rechercher quel rôle la constitution ainsi révélée permet à cet agent de jouer dans la nature ? Nous lui devons les phénomènes des couleurs, mais nous ne les lui devons pas à lui seul ; car il doit exister, en outre, une certaine relation entre les dernières particules des corps matériels et la lumière blanche, pour qu'ils soient capables d'extraire de celle-ci le luxe de la couleur. La fonction des corps naturels est ici *élective* et non pas *créatrice*. Il n'est aucune couleur engendrée par un corps naturel quelconque. Les corps naturels reçoivent, avec la lumière blanche qui les inonde, la somme totale de toutes les couleurs possibles, et leur action se borne au filtrage de ce total, à l'appropriation, du sein de ce total, des couleurs qui réellement leur appartiennent, et au rejet de celles qui ne sont pas à eux. Je fixerai ce point important dans vos esprits, si je vous dis que c'est la portion de la lumière blanche qu'ils rejettent, et non celle qui leur appartient qui donne aux corps leur couleur.

Qu'il nous soit permis de commencer ici nos recherches expérimentales par une question. Quelle est la signification du noir ? Faites tomber sur un ruban noir les cou-

leurs successives du spectre : il les éteint toutes. Le propre du noir est d'être le résultat de l'absorption de toutes les couleurs constituantes de la lumière solaire. Faites tomber sur un ruban rouge les couleurs du spectre. Dans la lumière rouge, le ruban est d'un rouge vif. Pourquoi ? Parce que la lumière qui entre dans le ruban n'est pas éteinte ou absorbée, mais en grande partie renvoyée à l'œil. Placez le même ruban dans le vert du spectre : il est noir comme du jais ; il absorbe la lumière verte, et fait de la portion sur laquelle il tombe un espace d'un noir intense. Recevez sur un ruban vert le vert du spectre : il brillera vivement de sa propre couleur ; placez-le dans le rouge : il est noir comme du jais. Cette fois, il absorbe toute la lumière qui tombe sur lui, et n'offre à l'œil que de l'obscurité.

Ainsi, lorsqu'on emploie de la lumière blanche, le rouge la crible en éteignant le vert, et le vert la crible en éteignant le rouge, et tous deux montrent la couleur restante ou résidu. Le procédé par lequel les corps naturels acquièrent leur couleur est, par conséquent, un procédé *négatif*. Les couleurs sont produites par soustraction, non par addition. Ce verre rouge est rouge parce qu'il détruit tous les rayons plus réfrangibles du spectre. Ce liquide bleu est bleu parce qu'il détruit les rayons moins réfrangibles. L'ensemble du verre et du liquide est opaque parce que la lumière transmise par l'un est éteinte par l'autre. De cette manière, par l'union de deux substances transparentes, nous obtenons une combinaison aussi noire que du goudron pour la lumière solaire. Cet autre liquide, enfin, est violet parce qu'il détruit le vert et le jaune, et ne laisse passer en toute liberté que les couleurs extrêmes du spectre. En mélangeant le bleu et le rouge, nous produisons un violet splendide.

Faisons un pas de plus afin d'être exact. La lumière qui tombe sur un corps est divisée en deux parties. L'une qui est réfléchie par la surface du corps, et celle-ci est de la même couleur que la lumière incidente ; si la lumière incidente est blanche, la lumière réfléchie superficiellement sera aussi blanche. La lumière solaire, par exemple, réfléchie même par la surface d'un corps noir, est blanche. La fumée de térébenthine la plus noire, au sein d'une chambre obscure que traverse un rayon de soleil issu d'un trou percé dans le volet, manifeste la trace du rayon par une traînée blanche due à la dispersion de la lumière à la surface de la suie. La Lune nous apparait comme si elle était vêtue de taffetas blanc, mystique, belle :

« *Clothed in white samite, mystic, beautiful* » ;

mais, alors même qu'elle serait recouverte du velours le plus noir, elle n'en serait pas moins suspendue dans les cieux sous forme de disque blanc, éclairant matériellement notre Terre d'une lumière blanche, comme elle le fait maintenant.

La seconde portion de la lumière pénètre dans le corps, et c'est du traitement qu'elle subit que dépend la couleur du corps. Analysons l'action des pigments sur la lumière. Ils sont composés de particules mélangées à un véhicule ; mais, quelque intime que soit le mélange, elles n'en sont pas moins des particules, séparées peut-être par des distances infiniment petites, mais enfin séparées. Pour me servir d'une phrase scientifique, les pigments ne sont pas optiquement continus. Cela posé, partout où la continuité optique est rompue, il y a réflexion de la lumière incidente. C'est la multitude des réflexions par les surfaces limites des particules qui empêche la lumière de passer à travers le verre

ou le sel de roche, lorsque ces substances transparentes sont réduites en poudre. La lumière ici est épuisée par une multitude d'échos, et éteinte par une véritable absorption. C'est cette même sorte de réflexion qui rend la nuée orageuse impénétrable à la lumière ; une semblable nuée est composée de particules d'eau mêlées à des particules d'air. Ces particules, prises séparément, sont transparentes ; mais elles sont pratiquement opaques quand elles sont mêlées ensemble.

Dans le cas des pigments, donc, la lumière est réfléchie par les surfaces limites des particules ; mais elle est aussi en partie absorbée à l'intérieur des particules. La réflexion est nécessaire pour renvoyer la lumière à l'œil ; l'absorption est nécessaire pour donner au corps sa couleur. La même remarque s'applique aux fleurs : la rose est rouge, non en vertu de la lumière réfléchie par sa surface, mais en vertu de la lumière diffusée dans sa substance, qui a été réfléchie par les surfaces de l'intérieur, et qui, en retournant à travers la substance, a son vert éteint. Un procédé semblable exercé par le vert foncé des feuilles éteint le rouge et renvoie à l'œil la lumière verte de la substance des feuilles.

Tous les corps, même les plus transparents, sont plus ou moins des absorbants de la lumière. Prenez le cas de l'eau : en petite quantité, elle n'affecte pas sensiblement la lumière. Une auge en verre, remplie d'eau limpide et interposée sur le trajet de notre rayon, ne change pas d'une manière perceptible les couleurs du spectre dérivé de ce rayon. Cependant l'absorption, quoique insensible, a eu lieu, et, pour la rendre sensible, nous n'avons qu'à accroître l'épaisseur de l'eau à travers laquelle la lumière passe. Au lieu d'une auge de 2 ou 3 centimètres d'épaisseur, prenez une couche épaisse de 4 ou 5 mètres ; la couleur de l'eau est alors

très-évidente. En augmentant l'épaisseur, nous absorbons plus de lumière, et en faisant cette épaisseur très-grande, nous absorbons toute la lumière. Du noir de fumée ou du goudron ne peuvent rien faire de plus, et la seule différence entre ces substances et l'eau, c'est que, dans le cas de ces substances, il suffit d'une très-petite épaisseur pour éteindre toute la lumière. La différence entre la transparence la plus parfaite et l'opacité la plus absolue est une pure différence de degrés.

Si donc nous faisons l'eau suffisamment profonde pour éteindre toute lumière, et si de l'intérieur de l'eau aucune lumière n'atteint notre œil, nous avons les conditions nécessaires pour produire le noir. Quand on les regarde convenablement de haut en bas, il est des portions de l'océan Atlantique auxquelles on aurait bien de la peine à attribuer même une trace de couleur ; c'est tout au plus si une teinte d'indigo sombre atteint l'œil. L'eau, de fait, est pratiquement *noire,* et ce noir est tout à la fois une indication de sa profondeur et de sa pureté; mais le cas est entièrement différent lorsque l'Océan contient des parties solides dans un état de suspension mécanique, capables de renvoyer de la lumière à l'œil.

Jetez, par exemple, un caillou blanc dans l'Océan ; à mesure qu'il descend, il devient de plus en plus vert, et, avant qu'il disparaisse, il atteint un vert bleu très-vif.

Brisez un semblable caillou en fragments, ces fragments se comporteront comme le caillou entier ; réduisez le caillou en poudre, chaque particule de poudre donnera sa petite quantité de vert, et si les particules sont assez fines pour rester suspendues dans l'eau, la lumière dispersée ou diffusée sera uniformément verte : de là le vert de l'eau qui recouvre les bancs de sable. Vous vous couchez avec l'eau

noire de l'Atlantique autour de vous, vous vous levez le matin et vous trouvez un vert vif; vous en concluez, avec raison, que vous traversez le banc de Terre-Neuve. Une eau semblable se montre chargée de matière fine dans un état de suspension mécanique. La lumière du fond peut quelquefois entrer en jeu, mais ce n'est pas nécessaire. L'écume semi-aqueuse engendrée par le clapotement de l'hélice ou de la roue à aubes d'un navire à vapeur émet aussi un vert vif; l'écume ici fournit la *surface réfléchissante,* l'eau comprise entre elle et l'œil est le *milieu absorbant.*

Rien n'est plus superbe que le vert des vagues de l'Atlantique, lorsque les circonstances sont favorables à l'exhibition de la couleur. Aussi longtemps qu'une vague ne commence pas à retomber, il n'apparaît aucune couleur; mais lorsque l'écume double le sommet de la vague comme une voûte de glace alpine, l'œil placé en dessous de la voûte voit souvent se déployer le vert le plus exquis. Il est métallique dans son éclat. L'écume est nécessaire à sa production, l'écume est d'abord illuminée, et elle disperse la lumière dans toutes les directions; la lumière qui passe à travers les parties les plus élevées de la vague atteint seule le regard, et donne à cette portion sa couleur sans tache. Le plissement de la vague en produisant, comme il le fait, une série de protubérances longitudinales et de sillons qui agissent comme des lentilles cylindriques, introduit des variations dans l'intensité de la lumière, et rehausse matériellement sa beauté.

Nous voici préparés à de nouvelles considérations sur un point auquel nous avons déjà touché, et qui a été longtemps l'occasion d'une erreur très-répandue. Vous trouverez affirmé dans beaucoup d'ouvrages que la lumière bleue et la lumière jaune mélangées ensemble produisent du vert; or

nous avons prouvé tout à l'heure que le bleu et le jaune sont des couleurs complémentaires produisant du blanc par leur fusion. Le mélange des *pigments* bleu et jaune produit indubitablement du vert; mais le mélange des pigments est complétement différent du mélange des lumières.

Helmholtz, qui prouva le premier que le jaune et le bleu sont des couleurs complémentaires, nous a révélé la raison du vert dans le cas des pigments. Aucune couleur naturelle n'est pure; un liquide bleu ou une poudre bleue ne donnent pas seulement passage au bleu, mais aussi à une portion du vert adjacent. Une poudre jaune est transparente non-seulement au jaune seul, mais aussi à une partie du vert adjacent; cela posé, si l'on mèle ensemble le bleu et le jaune, le bleu enlève le jaune, l'orangé et le rouge; le jaune, d'un autre côté, enlève le violet, l'indigo et le bleu. Le vert est la seule couleur pour laquelle tous deux sont transparents, et la conséquence est que, si de la lumière blanche tombe sur un mélange de poudre jaune et de poudre bleue, le vert seul sera renvoyé à l'œil. Vous avez déjà vu que le bleu si beau du sulfate ammoniacal de cuivre transmet une grande portion du vert, en même temps qu'il arrête les rayons moins réfrangibles de la lumière. Une solution jaune d'acide picrique permet aussi au vert de passer, tandis qu'il éteint toute lumière plus réfrangible. Qu'arrivera-t-il si nous envoyons un faisceau de lumière à travers ces deux liquides? La réponse expérimentale à cette question est actuellement sous vos yeux : la grande bande verte du spectre est seule restée sur l'écran.

L'impureté des couleurs naturelles est mise en évidence d'une manière frappante par une observation que M. Woodbury m'a récemment communiquée. En regardant à travers un verre bleu des feuilles vertes éclairées par le soleil, il

vit la lumière bleue réfléchie superficiellement. La lumière, au contraire, qui venait du corps des feuilles était rouge cramoisi ; en l'examinant, je vis que le vert employé dans cette observation transmettait les deux extrémités du spectre, le rouge aussi bien que le bleu, et qu'il éteignait le milieu : cela me donnait l'explication facile du fait observé. Dans le feuillage délicat du printemps, le bleu est pour la plus grande partie absorbé, et une lumière principalement vert jaunâtre, mais contenant une quantité considérable de rouge, vient de la feuille à l'œil. En regardant un semblable feuillage à travers le verre violet, le vert et le jaune sont arrêtés et le rouge seul atteint l'œil. Ainsi regardée, par conséquent, la feuille apparaît comme une rose légèrement bleuissante et présente une très-belle apparence ; avec le sulfate de cuivre ammoniacal qui ne transmet pas de rouge, cet effet ne pourrait pas être obtenu.

A mesure que l'année avance, le cramoisi tend vers un rouge-cuivre ; et dans les feuilles vert sombre des vieux lierres il est totalement absent. Si l'on fait tomber un faisceau concentré de lumière blanche sur des feuilles fraîches au sein d'une chambre obscure, le passage subit du vert au rouge, et de nouveau du rouge au vert, lorsqu'on interpose ou qu'on retire alternativement le verre violet, est vraiment surprenant. Regardées à travers ce même verre, les prairies de mai se colorent en pourpre très-chaud. Avec une solution de permanganate de potasse qui, tandis qu'elle éteint le centre du spectre, permet aux extrémités de passer plus librement que le verre violet, on obtient aussi des effets frappants [1].

---

(1) Nous constatons dans le feuillage et dans les fleurs des différences

La question de l'absorption considérée dans ses rapports avec le mécanisme moléculaire est une des plus subtiles et des plus difficiles de la Physique; nous ne sommes pas encore en position de l'aborder, mais nous y arriverons peu à peu. En attendant, nous pouvons jeter avec profit un regard en arrière, sur la série de relations que ces expériences nous révèlent. Nous avons en premier lieu dans la lumière solaire un agent d'une complexité excessive, un composé de constituants innombrables, réfrangibles à divers degrés. Nous trouvons en second lieu les atomes et les molécules des corps doués du pouvoir de tamiser la lumière solaire de la manière la plus variable, et de produire par ce tamisage les couleurs observées dans la nature et dans l'art. Pour pouvoir agir ainsi, ils doivent posséder une structure moléculaire proportionnée à la complexité de la lumière elle-même. En troisième lieu, nous avons l'œil et le cerveau humains organisés de manière à percevoir et à distinguer la multitude des impressions ainsi engendrées. La lumière, par conséquent, au départ ou à sa source, est complexe : tamiser et choisir, comme le font les corps naturels, est aussi complexe, tandis que, pour percevoir les impressions ainsi engendrées, l'œil et le cerveau humains, quelques efforts que nous fassions pour simplifier l'idée que

---

d'absorption frappantes. Le hêtre rouge-cuivre et le hêtre vert, par exemple, absorbent des rayons différents; or la croissance des arbres est due à quelques-uns des rayons ainsi absorbés. Les rayons chimiques seraient-ils donc les mêmes dans le hêtre rouge-cuivre et dans le hêtre vert. Dans deux fleurs comme la primevère et la violette, où les absorptions, à en juger par les couleurs, sont à peu près complémentaires, les rayons actifs chimiquement seraient-ils les mêmes? Le rapport général de la couleur à l'action chimique est digne de l'application de la méthode par laquelle Draper a prouvé d'une manière si concluante l'action chimique des rayons jaunes.

nous nous faisons de leur action, doivent encore être plus complexes ([1]). Pourquoi donc cette complexité? Si ce qu'on a appelé un but matériel était la seule fin à atteindre, un mécanisme beaucoup plus simple aurait suffi; mais, au lieu de simplicité, nous avons une prodigalité de rapports et d'adaptations, et tout cela en apparence, dans le seul dessein de nous rendre capables de voir les objets revêtus de couleurs splendides ([2]). Ne semble-t-il pas que la nature avait l'intention de nous préparer par son éducation à d'autres jouissances que celles qui résultent du boire et du manger. A tout événement, et quel qu'ait été le plan de la nature, il serait présomptueux de vouloir

---

([1]) Young, Helmholtz et Maxwell ramènent toutes les différences de nuances ou de couleurs à des combinaisons, en diverses proportions, de trois couleurs primitives ou principales. Il est démontré par l'expérience qu'avec le rouge, le vert et le violet, on peut obtenir *toutes* les autres couleurs du spectre.

([2]) Sir Charles Wheatstone a récemment appelé mon attention sur un ouvrage de Christian-Ernst Wünsch (Leipzig, 1792), dans lequel l'auteur énonce cette proposition qu'il n'y a ni cinq, ni sept, mais seulement trois couleurs simples, dans la lumière blanche. Wünsch produisit cinq spectres avec cinq prismes différents et cinq petites ouvertures, et il mêla les couleurs, d'abord deux à deux, ensuite de toutes manières, et en toutes proportions. Sa conclusion fut que le rouge est une couleur *simple*, incapable d'être décomposée; que l'orangé est composé d'un rouge intense et d'un vert faible; que le jaune est un mélange de rouge intense et de vert intense; que le vert est une couleur *simple;* que le bleu est composé de vert saturé et de violet saturé; que l'indigo est un mélange de violet saturé et de vert faible, tandis que le violet est une couleur *pure* et *simple*. Il trouva aussi que le jaune et le bleu-indigo produisent le *blanc* par leur mélange. Le jaune avec un bleu éclatant produit aussi du blanc qui semble cependant avoir une légère teinte de vert, tandis que des pigments de ces deux couleurs mêlés ensemble donnent toujours un vert plus ou moins beau. Wünsch distingue de la manière la plus formelle le mélange des pigments du mélange des lumières. Partant de la génération du jaune, il

dogmatiser sur ce plan, nous nous trouvons nous-mêmes, au terme de ses opérations, doués de la faculté de jouir non-seulement de ce qui est matériellement utile, mais doués de beaucoup d'autres facultés encore, pour des buts et des applications indéfinis, qui n'ont d'autre objet que le beau et le vrai.

---

s'exprime ainsi : « Je dis expressément *lumière jaune et verte*, parce que je parle des couleurs lumineuses et *non des pigments colorés*. » Quelque défectueuses qu'elles puissent être, les expériences de Wünsch, quant au fait principal, semblent être précises et concluantes. A peu près dix ans plus tard, Young adopta le rouge, le vert et le violet comme les couleurs primitives, chacune de ces couleurs étant capable de produire trois sensations, dont l'une, toutefois, prédomine sur les deux autres. Helmholtz a adopté, élucidé et enrichi cette notion (*Popular Lectures*, p. 249). Le beau Mémoire de Helmholtz sur le mélange des couleurs, traduit par moi, est publié dans le *Philosophical Magazine* de 1852. L'excellent Mémoire de Maxwell, sur la théorie des couleurs composées, est publié dans les *Philosophical Transactions*, t. 150, page 57.

# DEUXIÈME LEÇON.

Origine des théories physiques. — But de l'imagination. — Newton et la théorie de l'émission. — Rectification des théories physiques. — L'éther lumineux. — Théorie ondulatoire de la lumière. — Thomas Young. — Fresnel et Arago. — Conception de la notion des ondes. — Interférence des ondes. — Analogies du son et de la lumière. — Manifestation du mouvement ondulatoire. — Interférence des ondes du son. — Manifestation optique. — Ton et couleur. — Longueurs d'onde de la lumière et vitesse de vibration des particules d'éther. — Interférences de la lumière. — Phénomènes qui suggérèrent d'abord la théorie des ondulations. — Boyle et Hooke. — Les couleurs des lames minces. — La bulle de savon. — Les anneaux de Newton. — Théorie des accès. — Son explication des anneaux. — Renversement de la théorie. — Diffraction de la lumière. — Couleurs produites par la diffraction. — Couleurs de la nacre de perle.

Nous pouvons varier et étendre indéfiniment nos expériences sur la lumière; elles nous prouveront certainement que nous maîtrisons les phénomènes d'une manière admirable; mais toujours ce seront les dehors de l'agent et non l'agent lui-même qu'elles nous révéleront. Cependant l'esprit humain est tellement constitué et tellement éduqué, en ce qui regarde les choses naturelles, qu'il ne peut jamais être satisfait par la vue extérieure qu'il en a. La clarté et la fraîcheur ne prennent possession de l'esprit que lorsqu'il est traversé par la lumière des principes, qui montre que les faits de la nature sont organiquement enchaînés.

Cherchons donc ce qu'est cette chose que nous avons engendrée, réfléchie, réfractée, analysée.

En le faisant, nous apprendrons que la vie du physicien

expérimentateur est double. Il vit, dans sa vocation, une vie des sens, se servant dans ses expériences de ses mains, de ses yeux et de ses oreilles; mais une question semblable à celle que nous abordons nous entraîne bien au delà du domaine des sens. Il ne peut pas considérer, beaucoup moins résoudre la question : *Qu'est-ce que c'est que la lumière?* sans se transporter dans un monde situé bien au-dessous du monde sensible, et du sein duquel, en concordance avec certaines lois, tous les phénomènes optiques surgissent. Pour réaliser ce monde insensible, s'il nous est permis de l'appeler ainsi, l'esprit doit posséder un certain talent de peinture; il doit être capable de se former des images bien définies des choses que le monde insensible contient, et arriver à dire que si tel ou tel état de choses existe dans ce monde insensible, les phénomènes qui apparaissent dans le nôtre devront de toute nécessité surgir de cet état de choses. Si la peinture est correcte, les phénomènes seront expliqués; on aura formulé une théorie physique qui les unit et les explique tous.

La conception d'une théorie physique implique, comme vous le voyez, l'exercice de l'imagination. Ne vous effrayez pas de ce mot qui semble mettre mal à l'aise beaucoup de gens respectables, dans le rang des savants comme hors de leurs rangs. Pour que des hommes pris dans les rangs des savants puissent éprouver cette impression défavorable, il faut qu'ils se soient laissés séduire par la définition populaire de cette grande faculté, au lieu de l'avoir observée en opération dans leur propre esprit. Sans l'imagination, nous ne pouvons pas faire un pas au delà du monde purement animal, peut-être pas même jusqu'aux confins du monde animal; mais, en parlant ainsi, je prétends faire allusion

non à ce pouvoir déréglé qui joue capricieusement avec les faits, mais à une puissance bien ordonnée, bien disciplinée, dont la seule fonction est de former les conceptions que l'intelligence lui demande impérieusement. L'imagination ainsi réglée ne se sépare jamais en réalité du monde des faits. Le monde est le magasin où elle puise toutes ses peintures, et la magie de son art consiste, non à créer des choses nouvelles, mais à modifier tellement les dimensions, la position et les relations des choses sensibles, qu'elle les rende aptes à servir l'intelligence dans l'excursion qu'elle en veut faire au sein du monde insensible (1).

Descartes imagina que l'espace était rempli de quelque chose qui transmettait la lumière *instantanément*. Premièrement, parce que par son expérience il n'avait pu

---

(1) Le charmant extrait qui suit, où ce point est délicatement touché, a été découvert et transcrit pour moi par mon ami tant regretté, M. Bence Jones, le dernier secrétaire honoraire de l'Institution royale.

« Dans chaque sorte de grandeur il est un degré ou une espèce à laquelle nos sens sont proportionnés, dont la perception et la connaissance sont du plus grand usage pour le genre humain. Ce degré de grandeur est le fondement de la Philosophie, car, quoique toutes sortes et tous degrés de grandeurs puissent être également l'objet de nos spéculations philosophiques, c'est cependant d'un de ces degrés proportionnés à nos sens que le philosophe doit partir dans ses recherches pour monter ou descendre ensuite, selon que ses études peuvent l'exiger. Il fera bien, du reste, de considérer les objets de divers points de vue, et de suppléer aux défauts des sens par une imagination bien réglée : il ne doit aussi se confiner dans aucune limite d'espace ou de temps ; mais, comme sa connaissance de la nature est fondée sur l'observation des choses sensibles, il doit commencer par celles-ci, et revenir souvent vers elles pour juger par elles de ses progrès. Là est son point d'appui assuré ; et comme c'est d'elles qu'il part, s'il ne retrace pas souvent en arrière la route qu'il a parcourue, il courra le risque de perdre sa voie dans le labyrinthe de la nature. » (MACLAURIN, *An account, of sir I. Newton's Philosophical Discoveries*, 1728; second edition, 1750).

saisir aucun intervalle de temps mesurable entre l'apparition d'un éclair de lumière, quelque distinct qu'il fût, et l'effet produit sur sa conscience; secondement, parce que, aussi loin qu'on a pu pousser l'expérience, aucune puissance physique n'est transportée d'un espace dans un autre sans un véhicule ; mais son imagination lui vint en aide plus tard, par des exemples tirés du monde des faits. Lorsque, dit-il, on marche dans les ténèbres, un bâton à la main, au moment où l'extrémité éloignée du bâton frappe un obstacle, la main le sent. Ce fait explique ce qui, autrement, aurait été cru étrange, que la lumière émanée du Soleil atteint l'œil instantanément. Je vous prie de croire que la lumière dans les corps que nous appelons lumineux n'est rien de plus qu'un mouvement brusque et violent qui, par le moyen de l'air et d'autres milieux transparents, est amené à notre œil, exactement comme le choc à travers le bâton a atteint la main de l'aveugle. Cela est instantané et le serait encore, même quand la distance interposée serait plus grande que celle de la terre aux cieux. Il n'est pas plus nécessaire que quelque chose de matériel parti de l'objet lumineux atteigne l'œil, qu'il n'est nécessaire que quelque chose soit envoyé du sol à la main de l'aveugle pour le rendre conscient du choc de son bâton. Le célèbre Robert Hooke jeta le premier des doutes sur cette notion de Descartes, mais il l'adopta ensuite au moins en substance. La croyance à la transmission instantanée fut renversée par la découverte de Rœmer, dont il a été question dans notre première Leçon.

Le cas de Newton est une démonstration plus frappante encore de cette thèse, que dans la formation des théories physiques nous empruntons nos matériaux au monde des faits. Avant qu'il commençât à s'occuper de la lumière, il

était parfaitement initié aux lois du choc des corps élastiques, que tous vous avez vues plus ou moins parfaitement réalisées sur une table de billard. Pour ce qui regarde le choc des masses sensibles, Newton savait que l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion; il savait aussi que l'expérience, comme nous l'avons montré dans notre dernière Leçon (*fig.* 3), a démontré la même loi en ce qui concerne la lumière. Il trouva ainsi dans ses connaissances antérieures matière à des images théoriques. Il avait simplement à changer la grandeur des conceptions de son esprit pour arriver à la théorie de l'émission de la lumière. Il supposa que la lumière est constituée par des particules élastiques d'une petitesse inconcevable, lancées avec une inconcevable vitesse par les corps lumineux. De semblables particules tombant sur des surfaces polies seraient réfléchies en conformité avec la loi ordinaire du choc élastique. Le fait de la réflexion optique se présente certainement comme si la lumière consistait en de semblables particules; et c'est la seule justification que Newton pût invoquer en faveur de sa théorie de l'émission.

Mais ce n'est pas tout. Pour une autre particularité importante encore, les conceptions de Newton, relatives à la nature de la lumière, furent influencées par ses connaissances antérieures. Il avait longuement médité sur les phénomènes de la gravitation, et il avait fait en quelque sorte sa demeure du domaine des opérations de ce pouvoir universel. Peut-être que, à cette époque, son esprit avait fini par être trop fraîchement et trop profondément imbu de ces notions pour lui permettre de se former un jugement indépendant sur la nature de la lumière. Quoi qu'il en soit, Newton vit dans la réfraction une action de la force attractive exercée sur les particules de la lumière; il pour-

suivit cette idée avec la persévérance la plus opiniâtre. Pendant qu'il tombe verticalement, le mouvement d'un corps s'accélère à mesure qu'il s'approche de la surface de la Terre. Lorsqu'elles tombent de la même manière sur une surface horizontale, fût-ce à travers le verre ou l'eau, la vitesse des particules de lumière, à mesure qu'elles approchent de la surface, conformément à la loi de Newton, est elle-même accélérée. Lorsqu'elles approchent obliquement de cette surface, Newton suppose que ces particules, dès qu'elles en sont très-rapprochées, sont tirées ou entraînées vers elle, comme un projectile est tiré ou entraîné par la gravité à la surface de la Terre. Cette inflexion était, suivant Newton, la réfraction mise en évidence dans notre dernière Leçon (*fig.* 4). Enfin il supposa que la différence de couleur pouvait être due aux dimensions des particules. Telle fut la théorie physique de la lumière, énoncée et soutenue par Newton; et vous remarquerez qu'elle consiste simplement dans l'extension au monde insensible de conceptions nées dans le monde des sens.

Mais, quoique la région de la théorie physique se trouve au delà du monde des sens, la vérification de la théorie est du domaine de ce monde. Laissant la conception théorique à la racine du sujet, nous déterminons par une déduction rigoureuse quels sont les phénomènes qui doivent nécessairement sortir de cette racine. Si les phénomènes ainsi déduits s'accordent avec les phénomènes du monde actuel, c'est une présomption en faveur de la théorie. Si, à mesure que de nouvelles classes de phénomènes surgissent, ils se trouvent en harmonie avec la déduction théorique, la présomption devient encore plus grande. Si enfin la théorie confère au chercheur le don de vision prophétique et le rend capable de prédire l'existence de phéno-

mènes qui n'ont jamais encore été vus, et si ces prédictions soumises à l'épreuve se montrent exactes, la persuasion de la vérité de la théorie devient de plus en plus prépondérante.

En allant et revenant ainsi d'un nombre limité de phénomènes, le génie, par sa propre force expansive, arrive à une conception qui embrasse tous les phénomènes. Il n'est pas de plus admirable opération de l'esprit que celle-là; mais nous ne pouvons pas nous en rendre compte. Comme le souffle de l'Esprit-Saint dont parle la sainte Écriture, personne ne peut dire d'où il vient. Le passage du fait au principe est quelquefois lent, quelquefois rapide; et toujours il est une source de joie intellectuelle. S'il est rapide, le plaisir est concentré et devient une sorte d'extase ou d'enivrement. Pour tous ceux qui ont éprouvé ce plaisir, même dans un degré modéré, l'acte d'Archimède sortant du bain et courant nu à travers toutes les rues de Syracuse en s'écriant Εὕρηκα! *j'ai trouvé!* devient facile à comprendre.

Comment donc se comporta la théorie de l'émission, lorsque, par les déductions des faits, elle fut mise en face des phénomènes naturels? Éprouvée par l'expérience, elle se montra compétente pour l'explication de quelques faits, et son auteur s'ingénia de plus en plus pour lui faire rendre compte de tous les phénomènes. Il réussit si bien que des hommes aussi célèbres que Laplace et Malus, morts l'un en 1812, l'autre en 1827, que Biot et Brewster qui furent de notre temps, se rangèrent parmi ses disciples.

Cependant, même dans la première période de l'existence de la théorie de l'émission, un ou deux grands noms s'unirent pour protester contre elle, et nous fournirent un nouvel exemple de la loi que, dans la formation des théo-

ries, l'imagination scientifique doit toujours tirer ses matériaux du monde des faits et de l'expérience. On savait depuis longtemps que le son se propage à travers l'air par des ondes ou impulsions, et aussitôt que cette vérité fut bien ancrée dans l'esprit, on la transforma en conception théorique de la lumière. On supposa que la lumière, comme le son, pouvait aussi être le produit d'un mouvement ondulatoire; mais quelle pouvait être, dans ce cas, la matière au sein de laquelle se forment les ondes? Pour les ondes du son, nous avons l'air de notre atmosphère; mais l'effort tenté par l'imagination pour remplir l'espace de l'éther lumineux agité par les ondes de la lumière semblait si audacieux qu'il froissa plusieurs esprits timorés. Dans une de mes dernières conversations avec sir David Brewster, il me dit que sa principale objection contre la théorie des ondulations était qu'il ne pouvait pas prendre sur lui de croire le Créateur coupable d'une invention aussi absurde que celle de remplir l'espace d'éther, dans le but de produire la lumière. C'est là, je dois le dire, un très-dangereux terrain, et le reproche que la science peut faire à sir David sur ce point, comme à d'autres personnages très-estimables sur d'autres points, c'est qu'ils prétendent trop connaître les intentions du Créateur.

La conception d'un éther fut soutenue, et appliquée de fait à divers phénomènes, par le célèbre astronome Huyghens; elle fut adoptée et défendue par le célèbre mathématicien Euler; mais elle fut repoussée par Newton, dont l'autorité à cette époque suffisait pour l'abattre. Pouvons-nous réellement dire qu'elle fut abattue par l'autorité seule? Pas tout à fait. L'autorité de Newton était fondée en partie sur ce fait que, quoique Huyghens et Euler eussent raison au fond, ils n'étaient pas en possession de

données suffisantes pour établir leur droit. Aucune autorité humaine, quelque élevée qu'elle soit, ne peut rester debout en présence de la Nature parlant par l'expérience; mais la voix de la Nature peut être une voix incertaine, à cause du manque de données. C'était le cas dans la période dont nous parlons, et, dans une période semblable, tous les antagonistes furent réduits au silence par l'autorité de Newton.

Cependant, la grande théorie de l'émission, qui fut maîtresse du terrain pendant si longtemps, ressemblait à un de ces cercles dans lesquels, comme le disait notre compatriote Emerson, la force du génie enserre les opérations de l'intelligence, mais qui sont tôt ou tard brisés par une pression exercée du dehors. Dans l'année 1773 naquit à Milverton, dans le Somersetshire, un des hommes les plus remarquables que l'Angleterre ait jamais produits. Son éducation le préparait à suivre la carrière de la Médecine, mais il était trop vaillant pour se laisser dompter par la routine professionnelle. Il se prédestina lui-même à l'étude de la Philosophie naturelle, et prit rang dans ce département parmi les maîtres de la science. Il était aussi maître ès lettres. Les langues anciennes et modernes s'étaient logées dans son cerveau, et, pour parler la langue de son épitaphe : « il fut le premier qui pénétra l'obscurité dont les hiéroglyphes d'Égypte étaient enveloppés.» Il était réservé à cet homme de découvrir en Optique des faits que la théorie de Newton était impuissante à expliquer, et son esprit se prit à ruminer une théorie satisfaisante. Il s'était familiarisé avec tous les phénomènes du mouvement ondulatoire, avec tous les phénomènes du son, et il cultiva ce domaine avec le plus grand succès, comme s'il avait été le premier à le découvrir. Ainsi informé et discipliné, il était

préparé à découvrir toutes les ressemblances qui pouvaient se révéler entre les phénomènes de la lumière et les phénomènes du mouvement ondulatoire. Il était, en effet, appelé à découvrir des ressemblances de ce genre, et, aiguillonné par cette découverte, il poursuivit ses spéculations et ses expériences jusqu'à ce qu'il réussît enfin à placer sur une base inébranlable la théorie ondulatoire de la lumière.

Le fondateur de cette théorie fut Thomas Young, un nom peut-être très-peu familier à beaucoup d'entre vous, mais qui devra désormais vous être familier à tous. Permettez-moi, par conséquent, d'essayer, par une sorte de construction géométrique que je me hasardai à employer à Londres, de vous donner une idée de la grandeur de cet homme. Représentez-vous Newton debout à son époque, et Young debout à la sienne. Menez de Newton à Young une tangente à la tête de tous deux. Cette ligne descendra inclinée de Newton à Young, parce que Newton est certainement le plus grand des deux; mais la pente ne sera pas rapide, parce que la différence de taille n'est pas excessive. La ligne formera ce que les ingénieurs appellent une *pente douce*, un *plan incliné lent*. Placez au-dessous de cette ligne le plus haut de stature des hommes nés dans l'intervalle entre Newton et Young : il est douteux qu'il atteigne la ligne, car il faudrait pour cela qu'il fût plus grand intellectuellement que Young, et personne, probablement, n'est plus grand. Mais je ne veux pas que vous vous en teniez seulement au jugement de l'Angleterre : l'Allemand Helmholtz, un génie à la hauteur de Young, parle ainsi de lui : « C'était un des esprits les plus profonds que le monde ait jamais possédés, mais il eut la mauvaise fortune d'être par trop en avance sur son époque. Il

excita l'admiration de ses contemporains, qui cependant étaient incapables de le suivre dans les hauteurs où son intelligence audacieuse était habituée à planer. Ses idées les plus importantes devaient rester, par conséquent, enfouies et oubliées dans les in-folio de la Société royale, jusqu'à ce qu'une nouvelle génération fût arrivée graduellement et péniblement à faire les mêmes découvertes, et à prouver l'exactitude de ses assertions, la vérité de ses démonstrations. »

Il est très-vrai, comme Helmholtz le dit, que Young était en avance sur son époque; mais il faut ajouter quelque chose qui fasse comprendre quelle responsabilité pèse sur nos écrivains publics. Pendant vingt ans cet homme de génie fut étouffé, mis dans l'impossibilité d'être apprécié par l'intelligence de nos compatriotes, traité comme un rêveur, grâce aux vigoureux sarcasmes d'un écrivain qui avait alors le monopole de l'oreille du public, et qui, dans la *Revue d'Édimbourg*, jetait le ridicule sur Young et ses spéculations. Ce fut à deux Français célèbres, Fresnel et Arago, que Young fut redevable d'abord de la restitution de ses droits; tous deux, et spécialement Fresnel, refirent indépendamment, comme le dit Helmholtz, et étendirent grandement ses découvertes. Pour ceux qui étudiaient ses Ouvrages, Young se montra toujours en pleine lumière; mais ces vingt années de critique injuste le mirent au ban de l'esprit public, qui, en échange, fut tour à tour plein de la réputation de Davy d'abord, le collègue de Young à l'Institution royale, et plus tard de Faraday. Carlyle fait allusion à cette remarque de Novalis, que la confiance qu'un homme a en lui-même est énormément accrue, du moment qu'il trouve que d'autres croient en lui. Si le contraire est vrai, si c'est un fait que la dé-

fiance du public amoindrit les forces d'un homme, on ne saurait calculer le dommage que ces vingt années d'abandon ont causé, surtout si l'on tient compte de la puissance de production de Young, en tant que chercheur. Il me reste à rappeler que l'assaillant de Young était Henry Brougham, devenu plus tard lord chancelier d'Angleterre. Nous voici en présence de notre plus rude besogne; mais l'aptitude à une rude besogne dépend en grande partie de l'effort qu'on a fait préalablement pour monter son esprit ou le mettre à la hauteur du travail. Je fais donc appel à votre bonne volonté, et vous invite à ceindre vos reins pour la route que nous allons parcourir ensemble. Si nous réussissons à gravir ce soir la montagne qui se dresse devant nous, nos difficultés futures ne seront pas insurmontables.

Nous trouvons dans les plus vieux livres des anciens l'idée que le son est propagé par l'air : Aristote formula le premier cette idée, et le grand architecte Vitruve compare les ondes du son aux ondes de l'eau; mais le mécanisme réel du mouvement ondulatoire était inconnu des anciens, et ne fut, en effet, conçu clairement qu'au temps de Newton. La difficulté capitale du sujet consistait à distinguer entre le mouvement des ondes elles-mêmes et le mouvement des particules qui à chaque moment constituent l'onde.

Debout sur le rivage de la mer, observez le mouvement en avant des vagues qui s'avancent en roulant avant qu'elles aient été brisées par le frottement contre le fond. Chaque vague a son arrière et son avant, et si vous saisissez bien la figure de la vague ou onde en mouvement, vous verrez que chaque particule d'eau, sur l'avant ou le front de l'onde, est en train de monter; les particules du front atteignent successivement la crête de l'onde, et aussitôt

qu'elles ont franchi la crête elles commencent à descendre; elles atteignent alors le sillon ou creux de l'onde et ne peuvent plus tomber plus bas. Immédiatement après, elles deviennent le front de la vague suivante, s'élèvent de nouveau jusqu'à ce qu'elles atteignent la crête, et tombent ensuite comme auparavant. Ainsi, tant que les vagues marchent en avant horizontalement, les particules individuelles sont simplement élevées et abaissées verticalement. Observez un oiseau de mer, ou mieux, faites-vous nageur, abandonnez-vous à l'action des vagues; vous ne serez pas porté en avant, mais simplement bercé haut et bas. La propagation des vagues est la propagation d'*une forme*, et non pas le transport de la substance qui constitue l'onde.

La *longueur* de l'onde est la distance de crête à crête, tandis que la distance parcourue par les particules individuelles dans leur excursion verticale est l'*amplitude* de l'oscillation. Vous devez remarquer que dans cette description les particules d'eau vibrent transversalement ou perpendiculairement à la ligne de propagation [1].

Nous avons maintenant à faire un pas en avant, et c'est le plus important de tous. Figurez-vous deux séries d'ondes, parties d'origines différentes et se propageant dans la même eau. Si, par exemple, vous jetez deux pierres dans l'eau, les ondes circulaires parties de ces deux centres de perturbation se couperont les unes les autres. Cela posé, quel que soit le nombre de ces ondes, le mouvement de chaque par-

---

[1] Il n'entre pas dans ma pensée d'encombrer ici cette conception générale en entrant dans les détails des mouvements; mais je dois appeler l'attention sur le beau modèle de M. le professeur Lyman, à l'aide duquel on montre aux yeux que les ondes peuvent être produites par un mouvement circulaire. Ce mode de production, comme les frères Weber l'ont prouvé, est celui qui a lieu dans les ondes de l'eau.

ticule d'eau est la somme algébrique de tous les mouvements qui lui ont été communiqués. Si une crête coïncide avec une crête et un sillon ou creux avec un creux, le sommet de l'onde est porté à une hauteur double. Si un creux coïncide avec une crête, les mouvements sont en opposition et leur somme algébrique est zéro. Nous avons alors de l'eau au repos, et ce repos, nous avons maintenant à l'apprendre, correspond à ce que nous appelons l'*obscurité*. L'action de l'onde sur l'onde a reçu le nom technique d'*interférence*, qu'il ne faudra pas oublier.

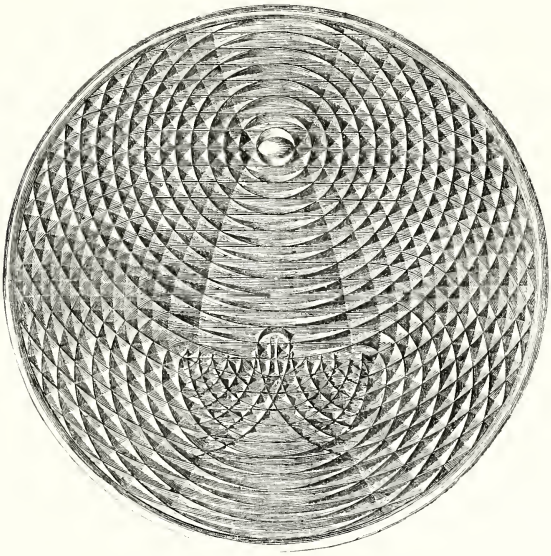
Pour l'œil d'une personne familiarisée avec les principes, rien n'est plus intéressant que l'entre-croisement des ondes de l'eau. Par l'interférence des ondes, la surface d'intersection est quelquefois tellement divisée, qu'elle forme une belle mosaïque, agitée de mouvements rhythmiques, comme si c'était une sorte de musique visible. Lorsque les ondes sont habilement engendrées à la surface d'un disque de mercure, et qu'on éclaire cette surface brillante par un faisceau de lumière intense, cette lumière, réfléchie sur un écran, révèle les mouvements harmonieux de la surface. La forme du vase détermine la forme des figures produites. Sur un disque circulaire, par exemple, une perturbation exercée au centre se propage sous forme d'ondes circulaires qui, après avoir été réfléchies, reviennent de nouveau au centre. Si le point troublé est à une petite distance du centre, l'interférence des ondes directes et réfléchies produit le magnifique chassé-croisé que représente la *fig.* 10 (1). La lumière réfléchie par une semblable surface donne un dessin ou patron d'une beauté extraordinaire.

---

(1) Extraite du *Wellenlehre* des frères Weber.

Lorsque le mercure est légèrement agité par une pointe d'aiguille dans une direction concentrique au contour du vase, les lignes de lumière tournent en rond, sous forme de fils contournés s'entrelaçant et se révélant les uns les autres d'une manière admirable. Lorsque le vase est carré, on

Fig. 10.



voit se produire une marqueterie splendide par le croisement des ondes directes et réfléchies. Ainsi, dans le cas du mouvement ondulatoire, les causes les plus ordinaires donnent naissance aux effets les plus exquis. Les vers de notre compatriote Emerson sont ici parfaitement applicables :

Tu ne peux brandir ton bâton dans l'air,
Ou plonger ta rame dans le lac,
Sans y sculpter le profil du beau,
Sans que ta rame lâche ses ondes rhythmées.

L'exemple le plus frappant de l'action des ondes sur les ondes que j'aie vu se rencontre près du Niagara. Sur une distance de 3 kilomètres à peu près au-dessous de la chute, la rivière Niagara coule tranquille dans une gorge creuse; le lit, par suite, est étroit et profond. Au lieu appelé *Whirlpool rapids* (rapide à tourbillon), j'estimai que la largeur de la rivière est de 100 mètres, et cette estimation fut confirmée par les habitants du lieu. Si l'on se rappelle que la pluie tombée sur près de la moitié d'un continent est concentrée dans cet espace étroit, on pourra se faire une idée de l'impétuosité de la rivière sortant de la gorge.

Deux sortes de mouvements sont là dans une condition évidente d'activité : un mouvement de translation et un mouvement d'ondulation; la course de la rivière à travers la gorge, et les grandes ondes engendrées par le choc contre les obstacles de la route. Au milieu du fleuve, le courant et l'agitation ont une violence extrême, ou du moins la force impétueuse des ondes individuelles se déploie là de la manière la plus frappante. De vastes pyramides d'eau jaillissent incessamment, quelquefois avec assez d'énergie pour lancer leurs sommets dans l'air, où elles demeurent suspendues comme des faisceaux de perles, et ces perles, lorsque le soleil tombe sur elles, sont d'une beauté extraordinaire.

La première impression, et, en effet, l'explication généralement admise de ces rapides, est que le lit central de la rivière est encombré par de gros quartiers de roche, et que le conflit, le ballottage, l'élan sauvage de l'eau en ces points sont dus au choc contre ces obstacles. Pendant que j'étais là, une explication très-différente s'est présentée à mon esprit. Les rochers tombés des collines adjacentes encombrent visiblement les flancs de la rivière; l'eau monte contre ces rochers et retombe verticalement d'une

manière rhythmée, mais avec violence, en donnant naissance à de grandes ondes. Au moment où chaque onde est engendrée, il se fait une composition immédiate du mouvement de l'onde avec le mouvement de la rivière. Les soulèvements qui, dans une eau calme, se propageraient en courbes circulaires autour du centre de perturbation, traversent la rivière obliquement, et le résultat est qu'il y a au centre conflit d'ondes engendrées réellement sur les rives. Le croisement des ondes peut s'observer sur une petite échelle au sein des gouttières après la pluie; on peut le reproduire aussi en versant simplement l'eau d'un pot à grosse panse et à large goulot. Dans le premier cas, nous avions une composition du mouvement ondulatoire avec le mouvement de la rivière, ici nous avons la concurrence d'ondes avec ondes. Là où une crête et un sillon se croisent l'un l'autre, le mouvement est annulé; là où un sillon rencontre un sillon, la rivière est creusée à une plus grande profondeur; enfin là où une crête vient en aide à une crête, nous avons ces sauts étonnants de l'eau qui brisent la cohésion des crêtes et les projettent dispersées dans l'air. Les phénomènes observés à *Whirlpool rapids* constituent, de fait, une des plus grandioses manifestations du principe des interférences.

La plus grande découverte de Thomas Young dans le domaine de l'Optique est le principe des interférences appliqué à la lumière. Longtemps avant Young, un physicien italien, le R. P. Grimaldi, jésuite, avait établi que, dans certaines circonstances, deux minces faisceaux de lumière, agissant chacun séparément, produisent sur un mur blanc une tache lumineuse, tandis que, si on les fait agir à la fois, ils s'éteignent en partie l'un l'autre, et produisent une

tache noire. C'était là un fait d'une signification fondamentale, mais il ne fallait rien moins que les découvertes de Young pour lui donner sa portée. Comment Young y arriva-t-il? Vous allez le saisir clairement. Vous savez que l'air est compressible; que par la compression il peut être rendu plus dense, et que par la dilatation il peut être rendu plus rare. Convenablement ébranlé, un diapason rend maintenant des sons que vous entendez tous, et la plupart d'entre vous savent que l'air à travers lequel le son passe est partagé en espaces dans lesquels l'air est condensé, suivis d'espaces dans lesquels l'air est raréfié. Ces condensations et raréfactions constituent ce que nous appelons les *ondes* du son. Vous pouvez imaginer que l'air d'une chambre soit traversé par une série d'ondes semblables, puis qu'une seconde série traverse le même air, dans des conditions telles que la condensation coïncide avec la condensation, et la raréfaction avec la raréfaction. La conséquence de cette coïncidence sera un son plus fort que celui produit par un des systèmes d'ondes pris séparément. Mais vous pouvez imaginer un état de choses dans lequel la condensation de l'un des systèmes coïnciderait avec la raréfaction de l'autre. Dans ce cas, les deux systèmes se neutraliseront l'un l'autre. Chacun d'eux pris séparément produit du son, tous deux pris ensemble ne produisent aucun son. Ainsi, en ajoutant du son à du son, nous produisons le silence, comme Grimaldi dans son expérience produisait l'obscurité en ajoutant de la lumière à la lumière.

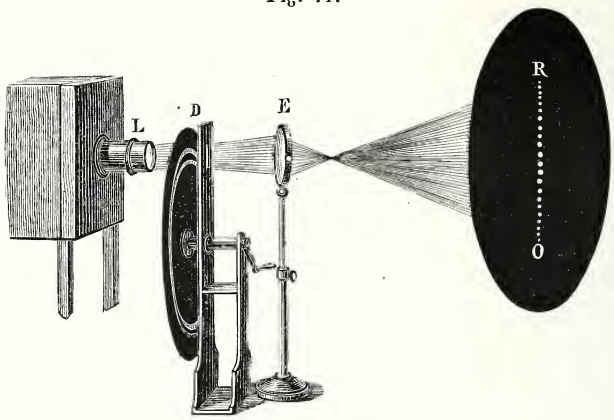
L'analogie du son avec la lumière brille ici à l'esprit. Young généralisa cette observation. Il découvrit une multitude de cas semblables et détermina leurs conditions précises. En admettant que la lumière fût un mouvement ondulatoire, toutes ses expériences d'interférence étaient ex-

pliquées; en admettant que la lumière fût constituée par des particules émises, rien n'était expliqué. Au temps de Huyghens et d'Euler, on avait admis l'existence d'un milieu servant à transmettre les ondes de la lumière; mais Newton, le premier, souleva l'objection que, si la lumière est constituée par un semblable milieu, les ombres ne pourraient pas exister. Les ondes, disait-il, s'infléchiront autour des corps opaques et produiront derrière eux le mouvement lumineux, de même que le son tourne un angle, ou que les ondes d'eau tournent autour du rocher. On a prouvé que le mouvement d'inflexion signalé par Newton a réellement lieu, mais que les ondes infléchies s'annulent l'une l'autre par leur interférence mutuelle. Young aussi découvrit une différence fondamentale entre les ondes de la lumière et celles du son. Si vous pouviez voir l'air à travers lequel le son passe, vous constateriez que chaque particule individuelle est animée d'un mouvement d'oscillation de va-et-vient dans la direction de la propagation du son. Si vous pouviez voir l'éther lumineux, vous trouveriez aussi que chaque particule individuelle fait de petites excursions de va-et-vient; mais cette fois le mouvement, semblable à celui assigné aux particules d'eau dont nous avons parlé, sera transversal à la ligne de propagation. Les vibrations de l'air sont *longitudinales*, les vibrations de l'éther sont *transversales*. Je désire que vous saisissiez avec clarté les caractères distinctifs du mouvement ondulatoire dans l'éther et dans l'air, et dans ce but je tiens à faire devant vous une expérience où les particules de l'air sont représentées par de petites taches de lumière RO (*fig.* 11).

Elles proviennent d'une spirale tracée en blanc sur une plaque circulaire en verre D, revêtue de noir de fumée, de telle sorte que, si le cercle tourne, les taches se meuvent par

impulsions successives sur l'écran [1]. Dans cette expérience, vous voyez comment des pulsations marchent incessam-

Fig. 11.




ment en avant, tandis que leurs composantes exécutent des oscillations de va-et-vient. C'est l'image d'une onde sonore dans laquelle les vibrations sont longitudinales. Avec une autre roue en verre D (*fig.* 12), nous produisons l'image d'une onde transversale OR, et ici nous voyons les ondes se propager successivement sur l'écran, tandis que chaque tache individuelle fait une excursion de va-et-vient perpendiculaire à la ligne de propagation.

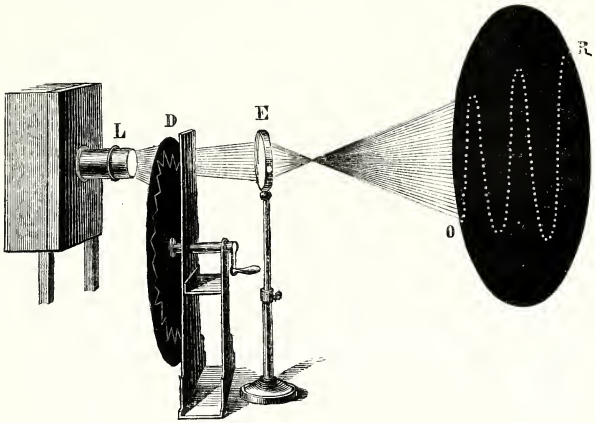
Voyez ce qui arrive si l'on fait tourner la glace très-rapidement : considérées objectivement, les ondes transversales se propagent elles-mêmes comme auparavant, mais subjectivement l'effet est totalement changé. A cause de la persistance de l'impression sur la rétine, les taches de lumière décrivent simplement sur l'écran une série de lignes lumi-

[1] L'appareil a été construit par un habile fabricant d'instruments d'acoustique, M. Rudolf König, de Paris.

neuses parallèles; la longueur de ces lignes marque l'amplitude de la vibration. Ici l'impression du mouvement ondulatoire a tout à fait disparu.

L'exemple le plus familier de l'interférence des ondes du son nous est fourni par les battements que font naître deux

Fig. 12.




sons musicaux légèrement écartés de l'unisson. Quand deux diapasons à l'unisson parfait sont excités ensemble, les deux sons coulent sans rien de heurté, comme s'ils ne faisaient qu'un seul son; mais, en attachant avec de la cire à l'un des diapasons un petit poids, forçons-le à vibrer plus lentement que son voisin. Supposons que l'un fasse cent-une vibrations dans le temps exigé par l'autre pour en faire cent, et supposons qu'au départ les condensations et les raréfactions des deux diapasons coïncident. A la cent-unième vibration du diapason le plus rapide, elles coïncideront de nouveau, car ce diapason en ce point a gagné sur l'autre une vibration entière, ou une longueur d'onde. Mais un peu de réflexion nous montrera clairement qu'à la cinquantième vibration les deux diapasons sont en opposi-

tion. Ici l'un tend à produire une condensation, tandis que l'autre tend à produire une raréfaction ; ces actions réunies des deux diapasons font, par conséquent, que le son est éteint et que nous avons une pause de silence. Cela arrive quand un diapason a gagné *une demi-longueur d'onde* sur l'autre. A la cent-unième vibration, comme nous l'avons déjà dit, nous avons une coïncidence, et par conséquent une augmentation de son ; à la cent-cinquantième vibration, nous avons de nouveau l'extinction du son. Ici l'un des diapasons sera en avance sur l'autre de *trois demi-ondes*. En général, les ondes s'ajoutent lorsque l'une des séries est en avance sur l'autre d'un nombre *pair* de demi-longueurs d'onde, et elles s'annulent lorsque l'une des séries est en avance sur l'autre d'un nombre *impair* de demi-longueurs d'onde. Avec deux diapasons placés dans ces circonstances, nous obtenons ces chocs intermittents de sons séparés par des pauses de silence auxquels on a donné le nom de *battements*. Par un arrangement convenable, il est possible de faire qu'un son en éteigne complétement un autre : par exemple, les vibrations des deux branches d'un diapason s'annulent complétement l'une l'autre ([1]) dans quatre directions distinctes.

Le *ton* d'un son est complétement déterminé par la rapidité des vibrations, et son *intensité* par leur amplitude. L'élévation du ton par la rapidité des vibrations peut être démontrée à l'aide de la sirène, qui consiste dans un disque percé de trous et tournant au-dessus d'un cylindre, du sein duquel l'air sort comprimé, et qui à son sommet est aussi percé de trous. Lorsque les trous du disque coïncident avec

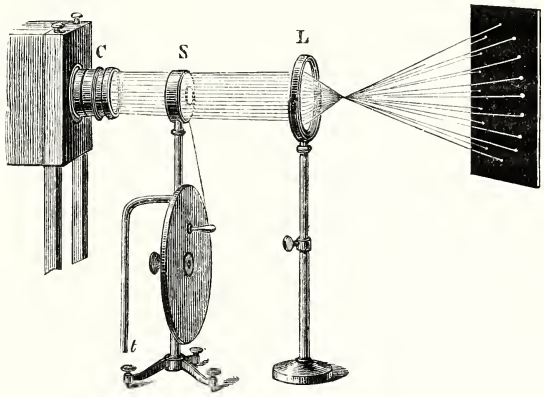
---

([1]) *Le Son*, Leçon VII. Gauthier-Villars.

ceux du cylindre, il sort une bouffée d'air, et si les bouffées se succèdent l'une à l'autre assez rapidement, les impressions produites sur l'oreille se fondent ensemble et donnent un son musical continu. Plus la rotation du disque est rapide, plus est rapide la succession des pulsations et plus le ton du son est élevé. Au moyen de la sirène, on peut de fait déterminer exactement le nombre des vibrations dues à un son musical quelconque, que ce son soit celui d'un instrument ou de la voix humaine.

En avant de notre lampe, on a dressé un instrument de ce genre très-élémentaire S (*fig.* 13). Le disque percé de

Fig. 13.




trous est mis en mouvement par une roue et une courroie, et lorsque les deux séries de trous coïncident, on voit sur l'écran une série de taches lumineuses, nettement définies grâce à la lentille objective L, et rangées sur la circonférence d'un cercle. En faisant tourner le disque lentement, les arrêts et les passages alternatifs de la lumière produisent une succession de clairs et d'ombres, une lumière vacillante qui tour à tour brille et s'éteint. En même temps,

on a fait entrer l'air dans la sirène à travers le tube *t*, et vous entendez un son tremblant, un trémolo, correspondant au tremblement de la lumière; mais, si l'on augmente la rapidité de la rotation, la lumière, quoique interceptée comme auparavant, semble parfaitement continue, à cause de la persistance des impressions sur la rétine; et au moment où l'impression optique devient continue, l'impression acoustique le devient aussi. Les pulsations de la sirène s'unissent ensemble pour former une note continue, dont le ton s'élève avec la rapidité de la rotation. Un mouvement de la tête amène les images des taches à balayer en quelque sorte la rétine, en formant comme des grains de chapelet; le même effet est produit sur notre écran par le balancement de la lorgnette ou lentille qui a reçu les minces rayons de la sirène.

Ce que le ton est au son, en acoustique, la couleur l'est pour l'œil dans la théorie ondulatoire de la lumière. Quoiqu'on ne les ait jamais vues, les longueurs des ondes de la lumière ont été déterminées. Leur existence est prouvée *par leurs effets*, et de leurs effets on peut aussi déduire exactement les longueurs d'ondes. Cette détermination peut, en outre, se faire de plusieurs manières, et, lorsque l'on vient à comparer les valeurs obtenues par des voies différentes, on trouve qu'il existe entre elles la plus rigoureuse harmonie. Ce concert d'évidence est un des points les mieux établis de la théorie ondulatoire de la lumière. Les ondes les plus courtes du spectre visible sont celles du violet extrême; les plus longues celles de l'extrême rouge; les autres couleurs sont de tons ou de longueurs d'ondes intermédiaires. La longueur d'onde du rouge extrême est telle qu'il en faudrait 92 295 placées à la suite l'une de l'autre pour former une longueur de 1 centimètre, tandis qu'il faudrait

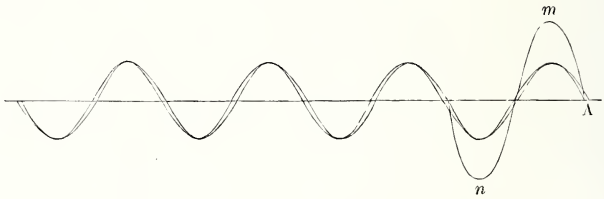
pour remplir cette même distance 16 157 longueurs d'onde du violet extrême. Cela posé, la vitesse de la lumière est en nombre rond de 300 000 kilomètres par seconde, ou trente millions de centimètres, et multipliant le nombre de ces centimètres par 92 295, nous obtenons le nombre d'ondes du rouge extrême distribuées sur une longueur de 300 000 mètres. *Toutes ces ondes entrent dans l'œil et frappent la rétine au fond de l'œil dans une seconde.* Le nombre des chocs par seconde, nécessaire à la production de la sensation du rouge, est, par conséquent, de quatre cent cinquante et un millions de millions. On peut trouver, d'une manière semblable, que le nombre des chocs correspondant à la sensation du violet est sept cent quatre-vingt et un millions de millions.

Tout l'espace est rempli par une matière qui oscille avec cette vitesse. De chaque étoile, des ondes de ces dimensions s'élancent avec la vitesse de la lumière, semblables à de petites balles cylindriques, et dans l'éther aussi bien que dans l'eau, le mouvement de chaque particule est la somme algébrique de tous les mouvements distincts qui lui sont communiqués. Cependant un mouvement ne doit pas en éteindre un autre, ou, si l'extinction a lieu sur un point, elle est rigoureusement compensée sur un autre point. Chaque étoile affirme par sa lumière son individualité, comme si seule elle avait envoyé son tressaillement à travers l'espace.

Le principe des interférences, démontré par Young, s'applique aux ondes de la lumière comme aux ondes de l'eau et aux ondes du son, et les conditions d'interférence sont les mêmes pour les trois systèmes d'ondes. Si deux séries d'ondes lumineuses de même longueur partent au même moment d'une origine commune A (*fig.* 14), les sommets coïncidant avec les sommets, les creux avec les creux,

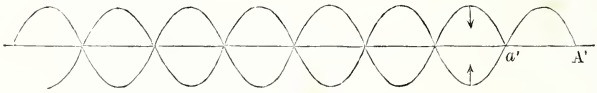
les deux systèmes se fondront ensemble pour former un système unique d'amplitudes doubles A *mn*. Si, des deux séries partant en même temps du même point, l'une au départ est en avant d'une longueur d'onde entière, elles s'ajoutent encore, et nous avons un effet lumineux aug-

Fig. 14.




menté. Exactement comme dans le cas du son, cette même addition a lieu lorsque l'un des systèmes d'ondes est en avance sur l'autre d'un nombre *pair* quelconque de demi-ondulations. Mais si l'un des systèmes est en avance d'une demi-longueur d'onde, comme A'*a'* (*fig.* 15), ou d'un

Fig. 15.




nombre *impair* quelconque de demi-longueurs d'onde, alors les sommets de l'une coïncident avec les creux ou sillons de l'autre; l'un des systèmes de fait tend à *élever* les particules de l'autre au moment précis où le second système tend à les *abaisser* : de là, sous l'action simultanée des deux forces opposées (indiquées par les flèches), l'éther lumineux reste parfaitement en repos. Ce silence de l'éther est ce que nous appelons *obscurité;* il correspond, comme nous l'avons déjà dit, avec le retour au niveau mort dans le cas de l'eau.

Nous avons dit dans notre première Leçon, en faisant allusion aux couleurs produites par l'absorption, que la fonction des corps naturels est sélective et non créatrice, qu'ils éteignent certains constituants de la lumière solaire blanche et se revêtent des couleurs de la lumière non éteinte. Il doit sauter à vos esprits que, puisque nous avons dans l'interférence un agencement par lequel la lumière peut s'éteindre elle-même, nous devons trouver en elle les conditions de la production de la couleur; mais cela suppose que quelques-uns des constituants pourront être éteints par l'interférence, tandis que les autres continueront à briller. C'est ce qui a lieu réellement, et ce fait est dû entièrement à la différence entre les longueurs d'ondes de la lumière.

Cette théorie peut être mise en pleine évidence par la classe de phénomènes qui suggéra d'abord à l'esprit de Hooke la théorie ondulatoire de la lumière. Ce furent les couleurs de couches minces transparentes de toutes sortes, connues sous le nom de *couleurs des plaques minces*. Sous ce rapport, aucun objet dans le monde n'offre un plus profond intérêt scientifique que la bulle commune de savon. Et ici, permettez-moi de le dire, je soulève une des grandes difficultés que l'amant de la science pure rencontre en présence de corporations essentiellement *pratiques* comme celles de l'Amérique et de l'Angleterre. Comment espérer, en effet, que de semblables corporations puissent éprouver une sympathie profonde pour des travaux qui semblent aussi éloignés du domaine de la pratique que la plupart des travaux de l'homme de science? Figurez-vous le docteur Draper dépensant ses journées à souffler des bulles de savon et à étudier leurs couleurs. Le supporteriez-vous avec assez de patience, et lui garantiriez-vous le nécessaire de la

vie? Et cependant, il faut s'en souvenir, c'était là l'occupation des esprits élevés qui s'appelèrent Boyle, Newton et Hooke; et c'est sur ces expériences que fut fondée une théorie dont les conséquences sont incalculables. Je ne vois pas pour vous, hommes du monde, autre chose à faire que de vous en rapporter à l'homme de science pour le choix de ses recherches; il est debout devant le tribunal de ses pairs, et c'est sur le verdict de ce seul tribunal que vous devez le juger.

Mais d'où naissent donc les couleurs des bulles de savon? Imaginez un rayon de lumière blanche tombant sur la bulle : quand il atteint la première surface de la couche, une fraction connue de sa lumière est réfléchie en arrière; mais une grande portion du faisceau entre dans la couche, atteint la seconde surface et se trouve en partie réfléchie de nouveau. Les ondes réfléchies par la seconde surface reviennent ainsi sur leurs pas, poursuivant avec ardeur les ondes de la première surface; et si l'épaisseur de la couche est ce qu'il faut pour produire le retard nécessaire, les deux systèmes d'ondes interféreront l'un avec l'autre, produisant, suivant le cas, une lumière accrue ou une lumière diminuée.

Mais, puisque les ondes de la lumière sont de longueurs différentes, il est évident que, pour produire leur extinction par elles-mêmes, dans le cas des longues ondes, il faut une plus grande épaisseur de couche que dans le cas des ondes plus courtes, et, par conséquent, des couleurs différentes doivent apparaître sur des couches d'épaisseurs différentes.

Prenez une petite *fiole* d'essence de térébenthine et répandez-la à la surface d'un des étangs de votre voisinage; vous verrez des nappes de ces mêmes couleurs briller sur toute la surface de l'eau. Nous les produisons de la manière suivante sur une petite échelle. On remplit d'eau un pla-

teau à thé ordinaire; au-dessous de la surface de l'eau plonge la pointe d'une pipette ; on fait tomber un rayon de lumière sur l'eau, et on le fait réfléchir sur l'écran; on verse de l'essence de térébenthine dans la pipette, elle descend, sort de la pointe en gouttes fines qui montent successivement à la surface : au moment où chaque goutte arrive à la surface, et s'y étend subitement en couche mince, des couleurs éclatantes illuminent immédiatement l'écran. Ces couleurs changent à mesure que l'épaisseur de la couche diminue par l'évaporation. Elles sont, en outre, disposées en zones circulaires, par suite de la diminution graduelle d'épaisseur du centre à la circonférence.

Une couche mince quelconque produira ces couleurs. La couche d'air entre deux plaques de verre pressées l'une contre l'autre exhibe, comme Hooke le fit remarquer le premier, de riches franges de couleurs. Vous avez maintenant sous les yeux un bel exemple de ces franges. La couche d'air n'est pas même nécessaire; il suffit de la rupture de la continuité. Frappez avec une hache la glace noire et transparente, noire parce qu'elle est pure et de très-grande profondeur, sous la moraine d'un glacier, vous produirez promptement, dans l'intérieur, des fentes où l'air ne pénètre pas et d'où vous verrez étinceler, quelquefois comme le feu, les couleurs des lames minces. Mais, comme nous l'avons déjà dit, la bulle de savon est devenue le point de départ de la plus intéressante des histoires. Avec un de ces liquides glycériques, employés par l'éminent physicien aveugle, M. Plateau, dans ses recherches sur la cohésion des couches liquides, nous obtenons, en air calme, des bulles de 30 à 40 centimètres de diamètre. Vous pouvez regarder soit la bulle elle-même, soit sa projection sur l'écran, vous verrez se montrer, dans les deux cas, de riches couleurs disposées

par zones. Rendons le faisceau parallèle et projetons-le sur les flancs, sur le fond, sur le sommet de la bulle, nous voyons apparaître sur l'écran de splendides éventails de couleurs qui tournent à mesure que le faisceau fait le tour de la bulle. Par cette expérience, les mouvements intérieurs de la couche sont aussi mis en évidence d'une manière frappante.

On n'élabore pas en un instant de grandes théories. Les faits qui les réclament sont mis d'abord en évidence par des esprits observateurs. A la période d'observation succède ensuite la période d'examen approfondi, et de tentative d'explication. L'esprit humain est ainsi préparé graduellement à l'illumination théorique finale. Les couleurs des lames minces, par exemple, fixèrent l'attention du célèbre Robert Boyle. Dans son *Histoire expérimentale des couleurs*, il combat l'école qui affirme que la couleur est une *qualité pénétrative* qui atteint la partie la plus intérieure de l'objet, et lui oppose des faits. « Pour vous donner un premier exemple, dit-il, je n'ai qu'à vous rappeler ce que je vous ai appris, presque au début de cet essai, relativement au bleu, au rouge et au jaune, que l'on peut produire sur un morceau d'acier trempé; car, quoique ces couleurs soient très-vives, si vous brisez l'acier qu'elles ornent, vous constaterez qu'elles sont toutes superficielles. » Il décrit ensuite, dans une phraséologie qui prouve l'amour avec lequel il écrivait son livre, la belle expérience qui suit : « Nous prenons une certaine quantité de plomb très-pur et très-net, nous le fondons sur un feu vif, et nous le versons immédiatement dans un vase très-propre, de forme et de matière convenable (nous nous servons d'un vase de fer que la grande et soudaine chaleur ne puisse pas altérer); on enlève avec soin et vivement l'écume qui flotte; on aperçoit

alors, comme on devait s'y attendre, la surface unie et lustrée du métal fondu parée d'une couleur splendide aussi délicieuse que fugitive, qui fait immédiatement place à une autre couleur vive, bientôt remplacée par une troisième, laquelle, à son tour, est chassée par une quatrième, et ainsi de suite. Ces merveilleuses couleurs apparaissent ainsi successivement et s'évanouissent dès que la surface du plomb cesse d'être assez chaude pour présenter plus longtemps ce charmant spectacle. Les couleurs qui, les dernières, parent la surface, alors que le plomb commence à se refroidir, y demeurent; mais elles sont si superficielles que, si l'on vient à gratter tant soit peu la surface du plomb, on enlève en même temps toute la couleur. « Ces faits, ajoute Boyle, me suggèrent quelques pensées ou rêveries auxquelles en ce moment je n'ai pas le temps de vous initier. »

Il étend ses observations aux huiles essentielles de la Chimie et à l'esprit-de-vin, suffisamment agités pour avoir fait une grande provision de bulles; ces bulles observées attentivement se montreront parées des couleurs les plus variées et les plus vives, couleurs qui s'évanouissent immédiatement après le retrait de l'huile qui avait apporté aux bulles leur pellicule-enveloppe. Boyle fait mention aussi des couleurs des bulles de savon et de celles des pellicules de verre. « J'ai vu un homme éminemment habile à façonner le verre et à souffler des boules si minces qu'elles finissaient quelquefois par crever ; on constata avec ces boules la grande ténacité du verre; elle était telle qu'avant de se briser, il se laissait réduire en couches si extrêmement minces qu'elles montraient constamment à leur surface les couleurs variées de l'arc-en-ciel. »

Postérieurement à Boyle, les couleurs des lames minces occupèrent l'attention du célèbre Robert Hooke, dans les

écrits duquel nous trouvons une esquisse de la théorie des ondulations. Il décrit avec une grande netteté les couleurs obtenues sur les lames minces de verre de Moscou ou mica, celles aussi qui entourent les fissures dans les cristaux lorsque la continuité optique est détruite. Il montre très-clairement la dépendance où est la couleur de l'épaisseur de la couche, et prouve, par des observations microscopiques, que les plaques d'épaisseur uniforme montrent des couleurs uniformes. « Si, dit-il, vous prenez de petits morceaux de verre de Moscou ou mica, et qu'avec une aiguille ou un autre instrument convenable vous les cliviez en lames de plus en plus minces, vous trouverez que, tant que ces lames n'ont pas atteint une épaisseur déterminée, elles restent transparentes et incolores; mais que si vous continuez à fendre et à diviser, vous finirez par trouver enfin que chaque lame apparaîtra teinte ou imbue d'une couleur déterminée et très-vive. Si, en outre, vous fendez une jolie petite lame, de telle sorte qu'un des feuillets ait commencé à s'écarter de l'autre, et qu'entre ces deux feuillets il se soit introduit un milieu translucide, les lamelles transparentes qui tapissent cet espace montreront plusieurs arcs-en-ciel ou bandes colorées, dont les couleurs seront disposées et rangées suivant l'ordre des épaisseurs des différentes parties de la plaque. Hooke décrit ensuite pleinement et clairement l'expérience avec les verres pressés l'un contre l'autre, dont nous avons déjà parlé.

Prenez deux plaques doucies et polies de verre de lunettes, de la grandeur d'une pièce de deux francs, faites-les bien sécher toutes deux, puis, avec les deux index et les pouces, pressez-les très-fortement l'une contre l'autre, et vous verrez apparaître, lorsqu'elles seront très-près l'une de l'autre, plusieurs bandes irisées ou colorées, à peu près de la même

manière que dans le verre de Moscou, et vous pourrez aisément faire varier la couleur de l'une quelconque des parties du corps interposé en pressant les plaques de plus en plus fortement, ou en relâchant un peu la pression, c'est-à-dire qu'une partie qui se montre colorée en rouge peut se montrer plus tard colorée en jaune ou en bleu, vert, pourpre, etc. « Toute substance, dit-il, pourvu qu'elle soit suffisamment transparente et mince, déploiera ces couleurs. » Comme Boyle, il les obtint avec des lames de verre; « il les produisit aussi avec des bulles de poix, de résine, de colophane, de térébenthine, etc., avec des solutions de plusieurs gommes, comme la gomme arabique dans l'eau, avec toute liqueur glutineuse, le moût de bière, le vin, l'esprit-de-vin, l'huile de térébenthine, la bave de limaçon ».

Les écrits de Hooke montrent que, déjà de son temps, l'idée que la lumière et la chaleur étaient deux modes de mouvement avait pris possession de plusieurs esprits. « Premièrement, dit-il, que dans tous les corps en pleine combustion ignée les parties soient en mouvement, on n'aura, je pense, aucune peine à me l'accorder; que l'étincelle qui jaillit du caillou et de l'acier soit dans une agitation rapide, cela est rendu ailleurs très-probable; que la chaleur accuse un mouvement des parties intérieures, comme je l'ai déjà dit, on l'accorde généralement; que dans tous les corps extrêmement chauds il y ait un mouvement très-vif qui cause la lumière et un mouvement plus vigoureux encore qui cause la chaleur, on peut le conclure de la rapidité avec laquelle ces corps sont dissous. Enfin, ce doit être un mouvement vibratoire. » Son allusion au mouvement rapide de la lumière et au mouvement plus énergique de la chaleur est un trait remarquable de sagacité; mais la vision intuitive de Hooke vaut mieux que son raisonnement, car

les preuves qu'il invoque pour prouver que la lumière est un *mouvement vibratoire* n'ont aucune portée dans cette question.

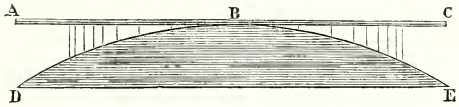
Cependant la théorie ondulatoire de la lumière préoccupait indubitablement l'esprit de cet homme remarquable. En essayant de rendre compte des couleurs des lames minces, il fait de nouveau allusion au rapport de la couleur à l'épaisseur; il insiste sur ce fait que la couche qui montre ces couleurs doit être transparente, et le prouve en montrant que, quelque mince que l'on ait rendu un corps opaque, il ne produit jamais de couleur. « Ce fait, dit-il, je l'ai souvent constaté en pressant un globule de mercure entre deux plaques de verre poli, moyen par lequel j'ai réduit ce corps à une minceur beaucoup plus grande que celle qui manifeste les couleurs quand le corps est transparent. » Vient ensuite cette remarque ingénieuse que, pour produire de la couleur, « il faut qu'un corps doué d'un pouvoir réflecteur considérable adhère à la face supérieure ou inférieure de la lame ou plaque mince; car j'ai toujours trouvé que, plus la réflexion est grande, plus vives sont les couleurs qui apparaissent. Par ces observations, continue-t-il, il devient très-évident que *la réflexion à la surface inférieure ou supérieure du corps est la cause principale de la production de ces couleurs.* »

Il trace une figure représentant avec exactitude la réflexion sur les deux surfaces de la couche, mais ici il cesse d'être clair : il attribue les couleurs à une coalescence ou confusion des deux impulsions réfléchies; le principe des interférences lui étant inconnu, il ne peut pas aller plus loin dans la voie des explications. Il ajoute, cependant, cette remarque d'une très-grande importance : « Une

chose qui semble être la plus urgente dans cette hypothèse, ce serait de déterminer la plus grande et la plus petite épaisseur nécessaires à produire ces effets. L'épaisseur de ces plaques colorées est si excessivement mince et nos microscopes sont si imparfaits, que, quoique je me sois souvent efforcé de les mesurer, je n'y ai pas réussi jusqu'ici.

Dans cette direction donc, et par l'opération active de différents esprits, on a observé des faits, on les a discutés, et l'on a déterminé les conditions de leur apparition. Un travail semblable, dans la science, est le prélude d'autres travaux, et les efforts de Boyle et de Hooke ouvrirent la voie à la campagne optique de Newton. Celui-ci vainquit les difficultés que Hooke avait trouvées insurmontables, et détermina par des mesures exactes le rapport de l'épaisseur de la couche aux couleurs qu'elle déploie. Pour déterminer cette épaisseur, son premier soin fut d'obtenir une couche de profondeur variable à la fois et calculable. Sur une lentille à plan convexe DBE (*fig.* 16), d'une très-

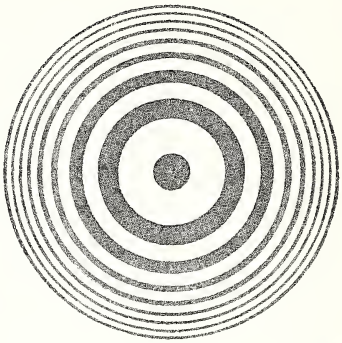
Fig. 16.




faible courbure, il plaçait une plaque de verre à surface plane AC, et obtenait ainsi une couche d'air, d'une épaisseur graduellement croissante du dedans au dehors, à partir du point de contact B. En regardant cette couche à la lumière monochromatique, il vit, avec le plaisir que cause une prévision justifiée, apparaître autour du point de contact une série d'anneaux brillants séparés les uns des autres par des anneaux obscurs, et qui devenaient de plus en plus serrés les uns contre les autres à mesure que la

distance au point de contact augmentait, comme on le voit (*fig.* 17). Lorsque la lumière employée était rouge, les

Fig. 17.



anneaux avaient un certain diamètre; lorsqu'on employait de la lumière bleue, le diamètre était moindre. En termes généraux, plus la lumière était réfrangible, plus les anneaux étaient petits. En faisant passer ses verres à travers le spectre, du rouge au bleu, Newton voyait les anneaux se contracter graduellement. C'est une très-belle expérience, et il paraît qu'elle a causé à Newton la plus vive satisfaction. Lorsqu'on faisait tomber de la lumière blanche sur les verres, et parce que les couleurs n'étaient plus superposées, on obtenait une série de cercles *colorés des couleurs de l'arc-en-ciel*. Vous avez maintenant sous les yeux une image amplifiée des *anneaux de Newton,* et, en employant tour à tour la lumière rouge, bleue et blanche, nous obtenons tous les effets observés par Newton. Vous remarquerez que, dans la lumière monochromatique, les anneaux sont d'autant plus serrés les uns contre les autres qu'ils s'éloignent plus du centre. Cela est dû au fait qu'à distance la couche d'air devient plus vite épaisse que près du centre. Lorsqu'on emploie la lumière blanche, ce rapprochement des anneaux

fait que les diverses couleurs se superposent; de sorte que, après une certaine épaisseur, elles s'unissent ensemble et donnent de la lumière blanche : les anneaux alors cessent tout à fait. Il suffit d'un moment de réflexion pour comprendre que les couleurs des plaques minces ne sont jamais sans mélange et monochromatiques.

Newton compara les teintes obtenues de cette manière avec les teintes des bulles de savon, et calcula les épaisseurs correspondantes. Comment le fit-il? Je puis vous le rendre accessible de la manière suivante : Supposez que l'eau de l'Océan soit absolument unie, elle représentera alors exactement la surface courbe de la mer. Concevons qu'un plan parfaitement horizontal touche sa surface en un point quelconque. Connaissant le diamètre de la Terre, tout ingénieur ou mathématicien ici présent pourra nous dire de combien la surface de la Terre est au-dessous de ce plan, à la distance de 1 mètre, de 10 mètres, de 100 mètres ou de 1000 mètres du point de contact du plan avec la mer. Il arrive souvent, en effet, dans les opérations de nivellement, qu'on tienne compte de la courbure de la Terre. Le calcul de Newton était précisément semblable; son verre plan était tangent à son verre courbe. De l'indice de réfraction et de la longueur focale du verre il déduisait le diamètre de la sphère dont son verre courbe formait un segment; il mesurait la distance des anneaux au point de contact, et calculait la profondeur entre le plan tangent et la surface courbe, exactement comme l'ingénieur aurait calculé la distance entre le plan tangent et la surface de la mer. Le merveilleux est que, alors qu'il s'agissait de semblables distances infinitésimales, Newton, avec ses moyens et sa disposition, ait réussi à obtenir une exactitude si remarquable.

Rendre compte de ces anneaux était la plus grande difficulté que Newton eût rencontrée. Il apprécia cette difficulté à sa juste valeur. Sur son œil d'aigle il n'y avait pas de taie, ni rien de vague dans sa conception. Dès le début, il mit sa théorie en face de cette question : comment, lorsqu'un faisceau de lumière tombe sur un corps transparent, quelques-unes des particules de la lumière sont-elles réfléchies et quelques-unes transmises ? Est-ce parce qu'il y a deux sortes de particules, les unes aptes à la transmission, les autres à la réfraction ? Ce ne peut pas être là la raison, car, si nous amenons un rayon de lumière qui a été réfléchi par un premier verre à tomber sur un second, il sera, en règle générale, partagé lui-même en deux autres, un rayon réfléchi et un rayon transmis. Ainsi les parties une fois réfléchies ne sont pas toujours réfléchies, et les particules une première fois transmises ne sont pas toujours transmises. Newton vit tout cela : il savait qu'il avait à expliquer comment une seule et même particule est, à un moment donné, réfléchie, et à un autre moment transmise. Il ne pouvait en être ainsi *qu'à cause de quelque changement dans les conditions de la particule elle-même.* Une seule et même particule, affirmait-il, est sujette à des *accès* de facile transmission et de facile réflexion.

Si vous voulez me suivre dans ma tentative de révélation du fondement spéculatif de cette théorie des accès, le bien qui en résultera pour votre intelligence vous récompensera largement de l'effort d'attention auquel vous vous serez nécessairement condamnés. Newton ne se hasarde pas à dire ce qu'il considérait comme la cause des accès; mais on ne saurait guère douter que son esprit se fût arrêté à une cause physique. On ne peut pas douter non plus qu'ici, comme dans tous ses essais de généralisation, il fût forcé de re-

demander à l'expérience les matériaux de sa théorie. Qu'il me soit permis d'essayer de retracer le cours de ses pensées et de ses observations. Un aimant lui a fourni la notion des pôles attirés et repoussés; et, habitué comme il l'était à voir dans le visible une image de l'invisible, il dut naturellement doter de semblables pôles ses particules de lumière. Quand elles tourneront leurs pôles attirés vers une substance transparente, elles devront être sucées et transmises; quand elles tourneront leurs pôles repoussés, elles devront être rejetées ou réfléchies. Ainsi, par l'attribution de pôles, on pouvait expliquer la transmission et la réflexion, à différents instants, de la même particule.

Regardez ces anneaux de Newton tels qu'ils sont vus dans la lumière rouge pure, ils sont alternativement brillants et noirs. La couche d'air correspondant au plus extérieur d'entre eux n'est pas plus épaisse qu'une bulle de savon ordinaire, et elle devient plus mince en approchant du centre. Newton, comme je l'ai dit, avait mesuré l'épaisseur correspondant à chaque anneau et mis en évidence la différence d'épaisseur d'un anneau à l'autre. Maintenant, notez le résultat. Pour plus de facilité, laissez-moi appeler $d$ l'épaisseur de la couche d'air correspondant au premier anneau obscur de Newton. Newton alors trouva que l'épaisseur correspondant au deuxième anneau obscur était $2\,d$, celle correspondant au troisième anneau $3\,d$, celle correspondant au dixième anneau $10\,d$, et ainsi de suite. Certainement, cette petite distance, qui revient ainsi périodiquement, doit avoir une signification cachée. Chacun peut se figurer l'immense intérêt avec lequel Newton pesa cette signification. Suivez bien l'essor probable de sa pensée. Il avait doté ses particules de pôles, et le voici forcé d'introduire une notion nouvelle, celle

de *période d'intercurrence* ou d'*accès*. Sa puissance de transfert du sensible à l'insensible le conduisit sans peine à supposer que les particules de lumière sont animées non-seulement d'un mouvement de translation, mais aussi d'un mouvement de rotation. Les connaissances astronomiques de Newton lui rendaient toutes ces conceptions familières. La Terre est animée d'un double mouvement semblable : dans le temps qu'elle met à parcourir deux millions de kilomètres sur son orbite, c'est-à-dire en vingt-quatre heures, notre planète fait une rotation entière sur elle-même ; et dans le temps exigé pour parcourir la distance $d$, on peut supposer que la particule de Newton fait une rotation complète. Il est vrai que la particule est plus petite que la planète, et que la distance $d$, au lieu d'être égale à deux millions de kilomètres, est un peu plus de treize dixièmes de millimètre ; mais, au point de vue de la qualité intellectuelle, ces deux conceptions sont identiques.

Imaginez-vous donc une particule entrant dans une couche d'air ayant exactement cette épaisseur $d$ : à l'entrée elle doit présenter son pôle attractif ; dans la couche, elle peut tourner complétement une fois ; de l'autre côté de la couche, son pôle attiré se présentera de nouveau : elle entrera, par conséquent, dans le verre, *et sera perdue pour l'œil*. Tout autour du point de contact, où la couche a précisément cette même épaisseur, la lumière disparaîtra également ; nous aurons, par conséquent, un anneau obscur.

Et voyez, maintenant, comme cette conception s'accorde bien avec la loi de proportionnalité découverte par Newton. Si l'épaisseur de la couche est $2\,d$, la particule a le temps de faire *deux* rotations complètes au sein de la couche ; si l'épaisseur est $3\,d$, elle fera *trois* rotations complètes ; elle fera *dix* rotations complètes si l'épaisseur est

10 $d$. Il est manifeste que dans chacun de ces cas, en arrivant à la seconde surface de la couche, le pôle attiré de la particule se présentera de nouveau. Il sera, par conséquent, transmis, et, parce qu'aucune lumière n'est envoyée à l'œil, nous devrons avoir en chacun de ces points un anneau obscur.

Les anneaux brillants sont la conséquence immédiate des mêmes conceptions. Ils se montrent entre les anneaux obscurs, puisque les épaisseurs auxquelles ils correspondent sont intermédiaires entre celles des anneaux obscurs. Considérez le cas du premier anneau brillant. L'épaisseur de la couche est $\frac{1}{2}d$. Dans cet intervalle, la particule tournant sur elle-même ne peut faire qu'une demi-rotation. Par conséquent, lorsqu'elle arrive à la seconde surface de la couche, c'est son pôle répulsif qui se présente : elle est donc renvoyée en arrière et elle atteint l'œil. A toutes les distances qui autour du centre correspondent à cette épaisseur, le même effet est produit, et par conséquent il se forme un anneau brillant. On explique de la même manière les autres anneaux brillants. Pour le second, où l'épaisseur est $1\frac{1}{2}$ de $d$, il s'est effectué une rotation et demie; pour le troisième deux rotations et demie. A chacune de ces distances, les particules présentent leurs pôles répulsifs à la seconde surface de la couche. Elles sont, par conséquent, renvoyées à l'œil, et elles y produisent une sensation de clarté. Cette analyse, quoique entourée de difficultés, lorsqu'on l'examine de près, nous met en état de comprendre comment la théorie des accès a pu prendre consistance dans l'esprit de Newton.

Nous avons déjà établi que la théorie de l'émission assignait une plus grande vitesse à la lumière dans le verre que dans l'air et les espaces célestes, et que sur ce point elle

était en complète opposition avec la théorie des ondulations. Une expérience proposée par Arago, exécutée avec une intelligence consommée par Foucault et reprise ensuite par M. Fizeau, a permis de soumettre la question à une épreuve décisive, à la résoudre par un *experimentum crucis,* et l'a résolue en faveur de la théorie des ondulations.

Dans le cas actuel, les deux théories sont aussi en désaccord. Newton admet que l'action qui produit les anneaux alternativement brillants et obscurs est exercée par *une seule de ses surfaces,* c'est-à-dire par la seconde surface de la couche. La théorie ondulatoire de la lumière affirme que les anneaux sont formés par l'interférence des ondes réfléchies sur les deux surfaces. L'expérience a encore démontré qu'il en est ainsi. Par des dispositions convenables, que nous apprendrons à connaître plus tard, on peut abolir la réflexion à l'une des surfaces de la couche, et, lorsqu'on le fait, les anneaux s'évanouissent complétement.

Des anneaux de faible intensité sont aussi produits par la lumière *transmise*. Ceux-ci sont attribués par la théorie des ondulations à l'interférence des ondes qui ont traversé directement la couche, avec celles qui ont subi deux réflexions au sein de la couche. Elles sont ainsi complétement expliquées.

On a dit que l'adoption par Newton de la théorie de l'émission a retardé les découvertes scientifiques. Mais on pourrait se demander si, dans le long cours des âges, les erreurs des grands hommes n'ont pas eu simplement pour effet d'imprimer au progrès intellectuel une marche cadencée ou périodique, au lieu d'une marche uniforme et continue, le *retard,* dans chaque cas, devenant le prélude d'une marche en avant plus impétueuse. C'est la stagnation et la confusion, plutôt que l'erreur, que nous devons éviter à tout prix.

Ainsi, quoique la théorie des ondulations eût été repoussée pour un temps, elle gagna de la force en vieillissant, et son développement dans le dernier demi-siècle a été si rapide et si triomphant, qu'elle n'a plus laissé place sur le champ de bataille aux théories rivales. Nous avons maintenant à diriger nos recherches sur une autre classe de phénomènes, dont cette théorie peut seule rendre compte d'une manière satisfaisante.

Newton, à qui l'idée d'un éther était familière et qui l'a énoncée dans quelques-unes de ses spéculations, objectait, comme nous l'avons déjà dit, que, si la lumière était constituée par des ondes, les ombres ne pourraient pas exister, parce que les ondes tourneraient autour des bords des corps opaques et agiteraient l'éther derrière eux. Il avait raison dans son affirmation : l'inflexion des ondes devait avoir lieu, et il se trompait en admettant qu'elle n'avait pas lieu. L'inflexion est réelle, quoique, dans les cas ordinaires, elle soit masquée par l'action des interférences. Cette inflexion de la lumière a reçu le nom de *diffraction*.

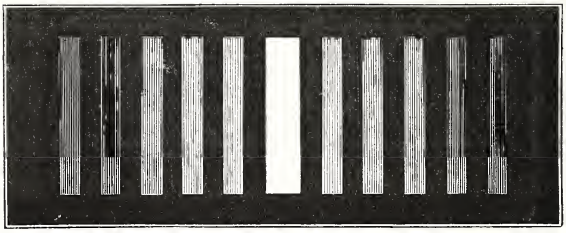
Pour étudier le phénomène de la diffraction, il est nécessaire que notre source de lumière soit un point physique ou une ligne fine; car, si l'on emploie une surface lumineuse, les ondes issues des différents points de la surface s'obscurcissent et se neutralisent l'une l'autre. On obtient un *point* lumineux de grande intensité en faisant entrer les rayons parallèles du Soleil par une ouverture percée dans le volet d'une fenêtre, et concentrant le faisceau par une lentille de court foyer. La petite image solaire au foyer de la lentille constitue un point lumineux très-convenable. L'image du Soleil formée à la surface convexe d'une petite boule sphérique de verre ou d'un verre de montre noirci à l'intérieur, quoique moins intense, peut aussi convenir.

On obtient une *ligne* de lumière intense en introduisant la lumière solaire par une fente rectangulaire, et mettant sur son trajet une forte lentille cylindrique. Le rectangle de lumière se contracte en une ligne physique au foyer de la lentille. Un tube de verre noirci à l'intérieur et placé au sein du faisceau lumineux réfléchit à sa surface une ligne lumineuse laquelle, quoique moins intense, répond encore très-bien au but.

Dans l'expérience que nous allons décrire, une fente verticale, de largeur variable, est dressée en avant de la lampe électrique, et l'on regarde cette fente à distance, à travers une autre fente verticale, aussi d'ouverture variable, et tenue à la main.

La lumière de la lampe étant préalablement rendue monochromatique par l'interposition en avant de la fente d'un verre rouge pur, dès que l'œil est placé sur la ligne droite qui joint les deux fentes, il devient témoin d'une apparition extraordinaire, représentée *fig.* 18. Premièrement, la fente

Fig. 18.



en avant de la lampe apparaît comme un vif rectangle de lumière, puis à droite ou à gauche on voit une longue série de rectangles lumineux décroissant de vivacité, et séparés l'un de l'autre par des intervalles d'obscurité absolue.

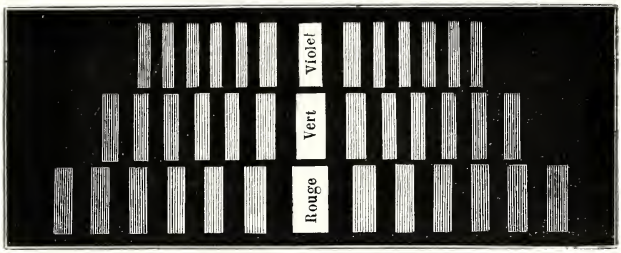
La largeur de ces bandes varie avec la largeur de la fente

tenue en avant de l'œil. Lorsque la fente devient plus large, les bandes deviennent plus étroites; lorsque la fente devient plus étroite, les bandes individuelles s'élargissent et s'éloignent en même temps l'une de l'autre, présentant entre elles des espaces obscurs plus larges qu'auparavant.

Sans rien changer à tout le reste, plaçons sur le trajet de la lumière un verre bleu ou une solution sulfo-ammoniacale de cuivre qui donne un bleu très-pur. On obtient ainsi une série de bandes exactement semblables aux premières sous tous les aspects, excepté un : les rectangles bleus sont *plus étroits,* et ils sont *plus serrés l'un contre l'autre* que les rectangles rouges.

Si l'on emploie des couleurs de réfrangibilités intermédiaires, ce que nous pouvons faire en faisant briller à travers la fente les différentes couleurs du spectre, nous obtenons des bandes colorées de largeurs et de positions intermédiaires entre celles du rouge et du bleu.

Fig. 19.




Si, par conséquent, c'est de la *lumière blanche* qui passe à travers la fente, les diverses couleurs ne seront pas superposées, et, au lieu d'une série de bandes monochromatiques, séparées les unes des autres par des intervalles d'obscurité, nous aurons une série de spectres colorés placés à côté l'un de l'autre. Lorsque la fente à distance est éclairée

par la flamme d'une chandelle, au lieu de la lumière électrique plus intense, ou si l'on place à distance un fil de platine chauffé à blanc par le courant électrique, les effets observés sont substantiellement les mêmes.

Quelle est la signification de ces expériences, et comment ces images latérales de la fente sont-elles produites? La théorie de l'émission est impuissante à donner aucune explication satisfaisante de ces résultats et d'une multitude d'autres semblables. Voyons comment la théorie des ondulations en rend compte.

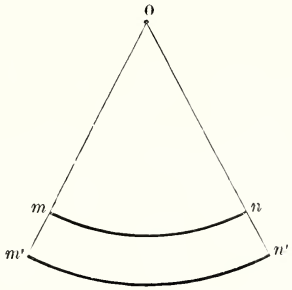
Et ici, dans le but d'atteindre une clarté absolue, je dois faire appel à cette faculté sur l'importance de laquelle j'ai tant insisté dans ces leçons et ailleurs, depuis longtemps déjà, la faculté d'imagination. Figurez-vous être sur le bord de la mer, avec une vague ou onde bien formée qui s'avance vers vous. Prenez une ligne de particules le long du front de cette onde, toutes situées à la même distance au-dessous de la crête; elles s'élèvent toutes de la même manière et avec la même vitesse. Prenez une ligne semblable de particules à l'arrière de la vague, elles tombent toutes de la même manière et avec la même vitesse. Prenez une ligne de particules le long de la crête, elles sont toutes dans la même condition par rapport au mouvement de la vague. La même chose a lieu pour une série de particules situées le long du creux ou du sillon de l'onde.

On dit des particules considérées dans chacun de ces cas, et placées respectivement dans les mêmes conditions, par rapport au mouvement de l'onde, qu'elles sont dans la même phase; mais si vous comparez une particule du front de l'onde avec une particule de l'arrière, ou, plus généralement, si vous comparez entre elles deux particules n'occupant pas la même position dans l'onde, les conditions de

leur mouvement n'étant plus les mêmes, on dit qu'elles sont dans des phases différentes de vibration. Si l'une des particules est sur la crête, et l'autre sur le creux de l'onde, alors, parce que l'une est en train de monter, l'autre en train de descendre, on dit qu'elles sont dans des phases *opposées* de vibration.

Nous avons encore à éclaircir un autre point, un point de la plus haute importance, dans la question que nous considérons. Soit O (*fig.* 20) un point pris en eau calme, et

Fig. 20.




qui, lorsqu'on y exerce une perturbation, produit une série d'ondes circulaires; la perturbation nécessaire à produire ces ondes est simplement une oscillation haut et bas du point O. Soient *mn* la position du front de l'une des ondes à un moment quelconque, et *m'n'* sa position une seconde ou deux plus tard. Cela posé, chaque particule d'eau, à mesure que l'onde passe sur elle, oscille, comme nous l'avons appris, haut et bas. Si donc cette oscillation est une source suffisante de mouvement ondulatoire, alors chaque portion distincte de l'onde *mn* devra être une semblable origine, et donner naissance à une série d'ondes circulaires. C'est là le point important auquel je désirais vous conduire. Chaque

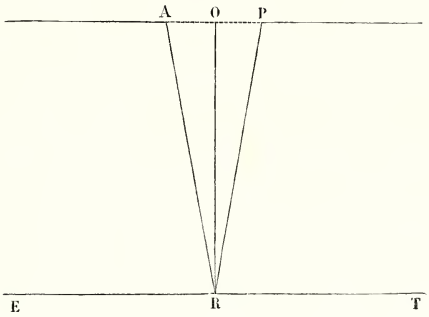
particule de l'onde *mn* doit agir de cette manière. Prenant chaque particule pour centre et l'entourant d'une onde circulaire d'un rayon égal à la distance entre *mn* et *m'n'*, la réunion de toutes ces petites ondes formera la grande onde *m'n'* absolument comme nous la voyons formée dans la nature. Ici, de fait, nous résolvons le mouvement ondulatoire en ses éléments, et, après avoir ainsi réussi à le faire, nous ne rencontrerons pas de grandes difficultés dans l'application de nos connaissances acquises aux phénomènes de la lumière.

Revenons maintenant à nos fentes, et, pour plus de simplicité, considérons d'abord le cas de la lumière monochromatique. Concevons une série d'ondes éthérées partant de la première fente, marchant vers la seconde et l'atteignant enfin. Lorsque chaque onde a traversé cette dernière, elle ne poursuit pas seulement sa course directe vers la rétine, elle diverge en outre à droite et à gauche, tendant à mettre en mouvement la masse entière de l'éther au delà de la fente. De fait, comme nous l'avons déjà expliqué, *chaque point de l'onde qui remplit la fente est lui-même le centre d'un nouveau système d'ondes, transmis dans toutes les directions à travers l'éther situé derrière la fente.* C'est là le célèbre principe de Huyghens. Nous avons maintenant à examiner comment les ondes secondaires agissent l'une sur l'autre.

Considérons d'abord la bande centrale de la série. Soit AP (*fig.* 21) la largeur de la fente dressée en avant de l'œil, largeur nécessairement exagérée dans la figure, et admettons que les points noirs qui sillonnent l'ouverture représentent les particules d'éther, toutes dans la même phase de vibration. Supposons que ET figure une portion de la rétine. Imaginons que de O, centre de la fente, nous menions une

perpendiculaire OR à la rétine. Le mouvement communiqué au point R sera donc la somme de tous les mouvements émanant dans cette direction des particules d'éther de la fente. En raison de l'extrême étroitesse de l'ouverture,

Fig. 21.

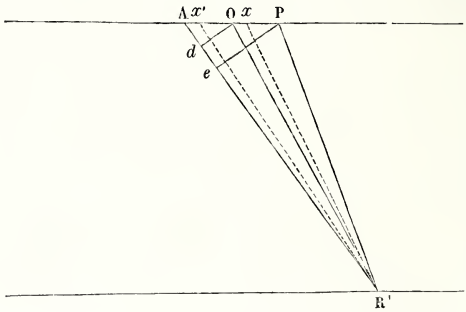



nous pouvons, sans erreur sensible, regarder tous les points de l'onde AP comme également distants de R. Aucune des ondes partielles ne restera donc sensiblement en arrière des autres ; par suite, en R et dans son voisinage immédiat, nous n'aurons pas de réduction sensible de la lumière par interférence. Cette lumière non diminuée produit la bande centrale brillante de la série.

Considérons maintenant celles des ondes qui divergent latéralement derrière la fente. Dans ce cas, les ondes des deux côtés de la fente ont, pour atteindre la rétine, à parcourir des distances inégales. Soit AP (*fig.* 22), comme auparavant, la largeur de la fente ; nous avons maintenant à étudier l'action des diverses parties de l'onde AP sur un point R′ de la rétine non situé sur la ligne qui joint les centres des deux fentes. Prenons le cas particulier où la différence de route entre les points extrêmes A et P à la rétine est une longueur d'onde entière de la lumière rouge :

comment cette différence affectera-t-elle l'illumination finale de la rétine?

Fig. 22.




Fixons notre attention sur l'oblique particulière qui va du centre O de la fente à la rétine en R'. La différence de marche entre les ondes qui passent le long de cette ligne et celle des deux bords est, dans le cas que nous supposons ici, une demi-longueur d'onde. Faisons *e*R' égal à PR; joignons P et *e*, et menons O*d* parallèle à P*e*. A*e* est donc la longueur d'une onde de lumière, tandis que A*d* est une demi-longueur d'onde. Cela posé, il suffit de la plus petite réflexion pour voir clairement que non-seulement il y a là désaccord entre les ondes centrale et marginale, mais que chaque ligne d'onde, comme *x*R', de l'un des côtés de OR trouve de l'autre côté de OR une autre ligne *x'*R', telle que le chemin parcouru diffère d'une demi-ondulation, avec laquelle, par conséquent, elle est en complet désaccord. La conséquence est que la lumière de l'un des côtés de la ligne centrale éteindra complétement la lumière de l'autre côté de cette ligne, et qu'une obscurité absolue sera le résultat de leur réunion. Le premier intervalle obscur de nos séries de bandes est ainsi expliqué. Il est produit par une obli-

quité de direction telle que les chemins parcourus par les ondes marginales diffèrent l'un de l'autre par une *longueur d'onde entière*.

Lorsque la différence entre les chemins des ondes marginales est une *demi-longueur d'onde,* il y a seulement extinction partielle de la lumière. L'intensité lumineuse correspondant à cette obliquité est un peu moindre que la moitié exactement les quatre dixièmes de celle de la lumière non diffractée.

Si la différence entre les chemins des ondes des bords est de trois demi-ondulations, et si le faisceau entier est divisé en trois portions égales, deux de ces portions, pour la raison que nous avons déjà donnée, se neutraliseront complétement l'une l'autre; la troisième sera seule efficace. Par conséquent, pour une obliquité qui produit une différence de marche de trois demi-ondulations entre des ondes marginales, nous avons une bande lumineuse, mais d'une intensité considérablement inférieure à celle de la bande centrale non diffractée.

Avec une différence marginale de chemins parcourus égale à quatre demi-ondulations, nous avons une seconde extinction du faisceau entier, parce que, ici, le faisceau peut être divisé en quatre parties qui, prises deux à deux, s'éteignent l'une l'autre. Un second espace d'obscurité absolue correspondra, par conséquent, à l'obliquité qui produit cette différence. Nous pouvons continuer ainsi indéfiniment; le résultat général est que partout où la direction des ondes est telle qu'elle produit une différence marginale de chemins parcourus égale à un nombre *pair* de demi-ondulations, nous avons une extinction complète; tandis que, si la différence marginale est un nombre *impair* de demi-ondulations, nous avons une extinction par-

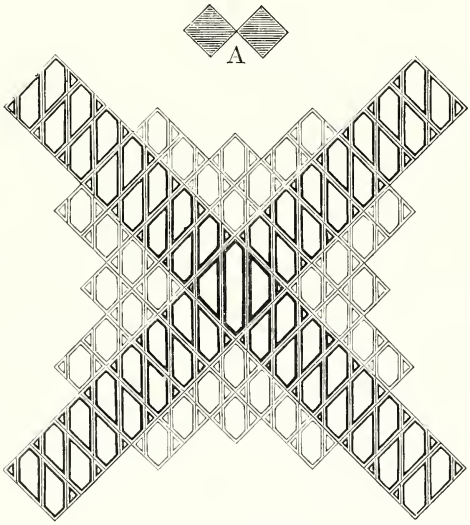
tielle : une portion du faisceau reste sous forme de bande lumineuse.

Un moment de réflexion rendra évident que, plus la fente est large, plus petite sera l'obliquité de direction exigée pour produire la différence nécessaire de chemin parcouru. Avec une fente large, par conséquent, les bandes, comme on l'a établi, seront plus serrées l'une contre l'autre qu'avec une fente étroite. Il est aussi évident que, plus l'onde est courte, moins sera grande l'obliquité exigée pour produire le retard nécessaire. Les maxima et minima de la lumière violette doivent, par conséquent, être plus près du centre que les maxima et minima de la lumière rouge. Les maxima et minima des autres couleurs prennent place entre ces extrêmes. C'est de cette manière très-simple que la théorie des ondulations explique complétement les apparences extraordinaires auxquelles nous avions fait allusion plus haut.

Si, au lieu d'une fente et de l'œil nu, on a recours à une fente avec l'œil armé d'une lunette, les effets sont amplifiés et rendus beaucoup plus brillants. Si, en outre, on regarde avec une lunette convenablement ajustée un point lumineux brillant à distance à travers une petite ouverture circulaire placée en avant, ce point se montrera entouré d'une série de cercles colorés. Si l'on emploie de la lumière monochromatique, ces bandes seront simplement brillantes et obscures; mais, si l'on se sert de lumière blanche, les cercles déploieront les couleurs de l'arc-en-ciel. Si l'on raccourcit la fente, de manière à lui donner la forme d'une ouverture carrée, on a deux séries de spectres, à droite et à gauche, à angle droit l'un par rapport à l'autre. Les effets obtenus peuvent, en réalité, varier à l'infini si l'on fait varier convenablement les dimensions, la forme et

le nombre des ouvertures à travers lesquelles on observe le point lumineux. En prenant deux ouvertures carrées se touchant par un angle en A, Schwerd observa les phénomènes dessinés dans la *fig.* 23. En ajoutant deux carrés aux

Fig. 23.

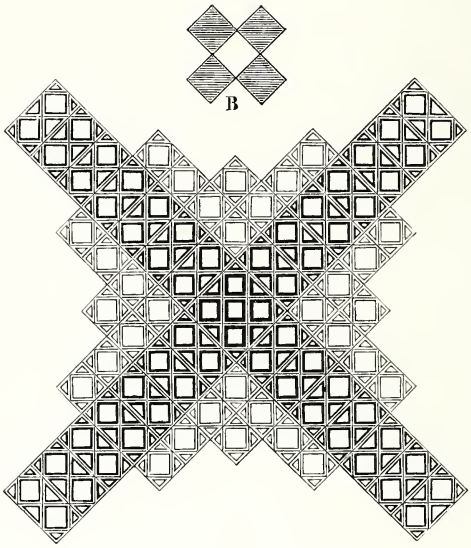



premiers, comme on le voit en B, il vit les apparences représentées *fig.* 24. La position de chaque bande de lumière et d'ombre a été déterminée par Fresnel, Fraunhofer, Herschel, Schwerd et autres, et elle s'est trouvée complétement vérifiée par l'expérience. Nos yeux ne nous montrent pas avec plus d'exactitude que le calcul théorique l'existence et la distribution de ces bandes.

La lanterne qui éclaire nos rues pendant la nuit, regardée à travers les mailles d'un mouchoir de poche, nous montre des phénomènes de diffraction. Les effets de diffraction obtenus en regardant à travers les barbes des plumes

des oiseaux, comme Schwerd l'a montré, sont très-brillants. L'iridescence de certains nuages alpins est aussi un effet de diffraction que l'on peut imiter avec les spores du lycopode. Si on les répand sur une plaque de verre, ces spores font

Fig. 24.




qu'un point lumineux, vu à travers la plaque ainsi saupoudrée, se montre entouré de cercles qui revètent une véritable splendeur lorsque la lumière est intense. Répandus dans l'air, ces spores produisent le même effet. Les phénomènes de diffraction obtenus dans l'acte de la précipitation artificielle de nuages formés par les vapeurs de divers liquides au sein d'un tube éclairé par une lumière intense sont excessivement beaux.

Un des cas les plus intéressants de diffraction produite par de petites particules, qui soit jamais tombé sous mes

yeux, est celui d'un artiste dont la vue était troublée par des cercles vivement colorés. Il avait une très-grande crainte de perdre la vue, et il assignait pour cause de sa crainte toujours croissante le fait que les cercles devenaient de plus en plus larges, et les couleurs de plus en plus vives. J'attribuai ces couleurs à des particules en suspension dans les humeurs de l'œil, et je me hasardai à relever son courage en l'assurant que l'accroissement des dimensions des cercles indiquait que les particules diffractantes devenaient plus petites, et qu'elles pourraient finir par être entièrement absorbées. Ma prévision se vérifia. Il est inutile d'insister sur la nécessité des connaissances optiques pour un oculiste praticien.

Avant d'aborder le terrain des phénomènes chromatiques présentés par les cristaux, il est bon de mentionner ici deux autres sources de couleur. Par interférence, au sein de l'atmosphère, la lumière d'une étoile, comme l'a montré Arago, s'éteint elle-même; la scintillation des étoiles et leurs changements de couleur sont dus à cette cause. Lorsqu'on regarde une étoile à travers une lunette à laquelle la main imprime de petites secousses, de manière à faire que l'image de l'étoile passe rapidement sur divers points de la rétine, on produit une série de grains de chapelet colorés; les espaces entre les grains correspondent aux périodes d'extinction. Des rayures fines produites sur un verre poli ou sur un métal réfléchissent par leurs côtés ou parois des ondes de lumière; quelques autres ondes réfléchies par les parois opposées de ces mêmes sillons interfèrent avec les premières, et elles s'éteignent l'une l'autre. Mais l'obliquité de réflexion qui éteint les ondes plus courtes ne peut pas éteindre les ondes plus longues : de là le phénomène de la couleur. Ces phénomènes sont mis en évidence d'une ma-

nière très-belle par la nacre de perle. Cette coquille est composée de couches excessivement minces, lesquelles, quand elles sont coupées transversalement dans l'acte du polissage de la coquille, mettent à nu leurs bords et fournissent les rainures fines et régulières nécessaires à la production des couleurs. La preuve la plus concluante que les couleurs sont dues à l'état mécanique de la surface se trouve dans le fait reconnu par Brewster, qu'en forçant la coquille à s'imprimer elle-même fidèlement sur de la cire à cacheter, de manière à transporter ses rainures sur la cire, on la rend apte à produire les couleurs de la nacre.

# TROISIÈME LEÇON.

Relation des théories avec l'expérience. — Origine de la notion de l'attraction et de la gravitation. — Notion de la polarité; comment elle est engendrée. — Polarité atomique. — Arrangements structuraux dus à la polarité. — Architecture des cristaux considérée comme une introduction à leur action sur la lumière. — Notion de la polarité atomique appliquée à la structure cristalline. — Manifestations expérimentales. — Cristallisation de l'eau. — Expansion par la chaleur et par le froid. — Manière dont l'eau se comporte étudiée et expliquée. — Influence de la cristallisation sur les phénomènes optiques. — Réfraction. — Double réfraction. — Polarisation. Action de la tourmaline. — Caractère des rayons émergents du spath d'Islande. — Polarisation par la réfraction ordinaire et la réflexion. — Dépolarisation.

Un des objets de notre dernière Leçon, et l'un des plus importants, a été la manière dont les théories sont formées. En premier lieu, elles naissent du désir inné à notre esprit de remonter à la source des phénomènes. D'abord infiniment petit dans les longs âges du passé, ce désir a grandi peu à peu et s'est fortifié au point de devenir un besoin impérieux de la nature intellectuelle de l'homme. Il y a longtemps que César a dit qu'il échangerait volontiers ses victoires contre une vue dérobée des sources du Nil. Il est en jeu dans la théorie atomique de Lucrèce; il a poussé Darwin à ces spéculations hardies qui ont tant agité l'esprit public dans ces dernières années. Mais, dans aucun cas, en forgeant ses théories, l'imagination n'a créé elle-même ses matériaux; elle étend, diminue, moule et affine, suivant le

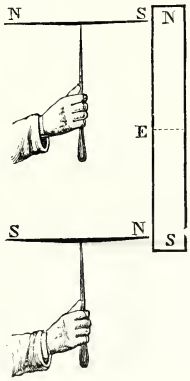
cas, les matériaux dérivés du monde des faits et de l'observation.

C'est plus encore le cas, évidemment, dans une théorie semblable à celle de la lumière, où ce sont les mouvements d'un milieu insensible qui se présentent à l'esprit. Newton prit soin de ne pas encombrer l'idée de la gravitation par des conceptions physiques non nécessaires; mais nous savons qu'il fut indulgent pour elles, quoiqu'il ne les rattachât pas à sa théorie. Mais même sa théorie, telle qu'elle est, n'entra pas dans son esprit sous forme de révélation étrangère au monde de l'expérience. Le germe de sa conception, que le Soleil et les planètes sont liés ensemble par la force de la gravitation, sortit de ce fait, vu par lui antérieurement, qu'un aimant attire le fer. La notion de la matière attirant la matière lui vint ainsi du dehors et non du dedans. Dans cette Leçon, la force magnétique doit nous servir d'entrée au sein d'un nouveau domaine insensible; aussi avons-nous, en premier lieu, à nous rendre maîtres des phénomènes élémentaires.

Les faits généraux du magnétisme sont mis très-simplement en évidence par une barre d'acier magnétisée, appelée communément *barreau aimanté*. Plaçant un semblable barreau debout sur une table, et approchant de sa masse une aiguille aimantée, nous constatons qu'une des extrémités de l'aiguille s'éloigne de l'aimant, et que l'autre s'en rapproche rapidement. Si nous faisons monter l'aiguille le long de l'aimant, en évitant toujours le contact, nous voyons la rapidité de ses oscillations décroître, parce que la force qui agit sur elle devient plus faible. Au centre, l'oscillation cesse. Au-dessus du centre, l'extrémité de l'aiguille, qui avait été d'abord attirée vers l'aimant, s'éloigne, et c'est l'autre extrémité qui s'approche. Si nous nous élevons en-

core, les oscillations deviennent plus violentes, parce que la force devient plus intense. A l'extrémité supérieure de l'aimant, comme à l'extrémité la plus basse, la force atteint un maximum; mais toute la moitié inférieure de l'aimant de E en S (*fig.* 25), attire une extrémité de l'aiguille, tandis

Fig. 25.

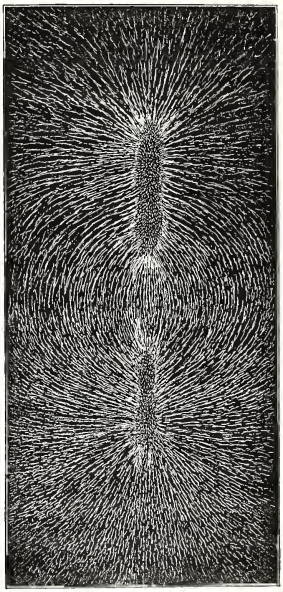



que toute la moitié supérieure de E en N attire l'extrémité opposée. Cette dualité de la force magnétique s'appelle *polarité,* et les points près des bouts du barreau, dans lesquels les forces semblent concentrées, s'appellent les *pôles.*

Mais qu'arrivera-t-il si nous rompons le barreau en deux à son centre E? Chacune des moitiés séparées agira-t-elle comme elle le faisait quand elle faisait partie du barreau entier? Non; chaque moitié est elle-même un aimant parfait, en possession de deux pôles. On peut le prouver en rompant quelque chose de moins précieux que le barreau, une aiguille à tricoter, par exemple, trempée et aimantée. Elle agit comme un aimant. Quand on la brise, chaque moitié agit comme le tout, et si ces moitiés sont de nouveau rompues, nous aurons toujours des aimants parfaits, en

possession, comme dans l'aiguille entière, de deux pôles. Poussez votre rupture de l'aiguille à ses dernières limites, vous ne pourrez même pas vous arrêter là. L'élan donné par l'observation vous entraîne bien au delà des bornes de vos sens, et vous force à regarder cette chose que nous appelons polarité magnétique comme résidant dans les dernières particules de l'acier. Vous arrivez ainsi à cette conclusion que chaque atome du barreau est lui-même doué de sa force polaire.

Fig. 26.



Semblable à toutes les autres forces, la force magnétique peut être ramenée à des lois mécaniques. Connaissant la direction et la grandeur de cette force, nous pouvons prévoir son action. Quand nous plaçons une petite aiguille

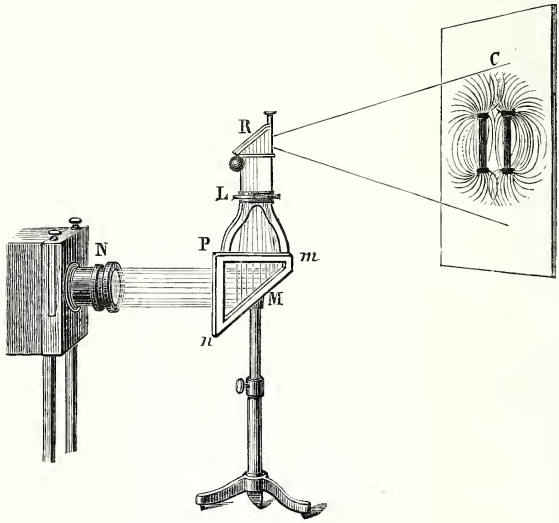
magnétique près d'un barreau aimanté, elle prend une position déterminée. Cette position peut être déduite théoriquement de l'action mutuelle des pôles. Si nous faisons tourner l'aiguille autour du barreau, il y aura pour chaque point une nouvelle direction déterminée de l'aiguille, et non pas toute autre. Une aiguille de fer sera tout aussi bien dirigée que l'aiguille aimantée, car l'aiguille de fer est aimantée elle-même par le barreau, et agit exactement comme une aiguille d'acier pourvu d'un magnétisme indépendant.

Si nous plaçons deux ou plusieurs aiguilles de fer près de l'aimant, l'action devient plus complexe, car ce n'est pas seulement le barreau qui agit sur les aiguilles, les aiguilles agissent l'une sur l'autre. Et si des aiguilles nous passons à de petites masses de fer, à de la limaille de fer, par exemple, nous trouverons que tous les grains agissent substantiellement comme des aiguilles, qu'ils se disposent et prennent des formes déterminées, dans leur obéissance à l'action magnétique.

Plaçant une feuille de papier ou un verre plan sur ce barreau aimanté, et saupoudrant le papier de limaille de fer, nous constatons une tendance des grains de la limaille à se disposer suivant des lignes bien définies. Elles ne peuvent pas suivre librement cette tendance, car elles sont empêchées par le frottement contre le papier. On les aide à se grouper en tapant sur le papier; chaque coup libère les particules pour un moment et les met à même de céder à leur tendance; mais c'est une expérience que je vois seul. Pour vous mettre à même de la voir, je prends une paire de petits aimants et, par un simple arrangement optique, je projette sur un écran les images agrandies de ces aimants. Répandant de la limaille de fer sur la plaque de verre à la-

quelle les petits aimants sont attachés, et tapant sur la plaque, vous voyez la limaille de fer dessiner les courbes magnétiques qui sont depuis longtemps familières aux hommes de science (1).

Fig. 27.




N est la face antérieure de la lampe électrique; M un miroir qui réfléchit le rayon lumineux verticalement; en P sont placés les deux barreaux aimantés avec la limaille de fer; L est une lentille qui forme l'image distincte des barreaux et de la limaille; R est le prisme à réflexion totale qui projette l'image C sur l'écran.

L'aspect de ces courbes avait tellement fasciné Faraday, que la plus grande portion de sa vie intellectuelle fut consacrée à méditer sur leur signification; il investit l'espace à travers lequel elles courent d'une sorte de matérialité, et

(1) De très-beaux spécimens de ces courbes ont été récemment obtenus et fixés par mon ami si distingué, M. le professeur Mayer, de Hoboken.

il est probable que le progrès des sciences, en reliant les phénomènes du magnétisme à ceux de la lumière, prouvera que ces *lignes de force*, comme Faraday les appelle, représentent une des conditions de ce mystérieux support (*substratum*) de toute action rayonnante.

Mais ce ne sont pas les courbes magnétiques elles-mêmes que nous avons à considérer : nous ne devons étudier ici que leurs relations avec les conceptions théoriques. Par l'action du barreau aimanté sur l'aiguille, nous arrivons à la notion d'une force polaire; par la rupture d'une bande d'acier aimanté, nous ajoutons la notion que la polarité peut s'attacher d'elle-même aux dernières particules de la matière. L'expérience avec la limaille de fer introduit dans l'esprit une nouvelle idée, à savoir celle de l'*arrangement structural*. Chaque couple de brins de limaille possède quatre pôles, dont deux sont attractifs et deux répulsifs. Les pôles attractifs se rapprochent, les pôles répulsifs se fuient; la conséquence qui en résulte est un certain arrangement défini des particules, l'une par rapport à l'autre.

A son tour, l'idée de structure, en tant que produite par la force polaire, ouvre l'entrée à l'intelligence dans une région entièrement nouvelle, et la raison pour laquelle je vous demande de m'accompagner dans cette région est que notre prochaine recherche aura pour objet l'action des cristaux sur la lumière. Avant de parler de cette action, je désire que vous réalisiez intellectuellement le mode de formation de la structure cristalline. Étudiez-le dans une carrière de granit; consacrez quelques minutes à l'examen de cette roche : sa texture n'est pas parfaitement uniforme, c'est plutôt une agglomération de morceaux qui, examinés de près, présentent des formes définies curieuses. Vous avez là ce que les minéralogistes appellent quartz, vous avez

le feldspath, vous avez le mica. Dans un cabinet minéralogique où ces substances sont gardées séparément, vous acquerrez même quelque idée de leurs formes. Vous y verrez aussi des échantillons de béryl, de topaze, d'émeraude, de tourmaline, de spath pesant, de spath-fluor, de spath d'Islande, et peut-être un diamant bien formé, tel qu'il sort des mains de la Nature, n'ayant pas encore passé par les doigts du lapidaire.

Ces cristaux, vous le remarquerez, sont formés suivant certaines lois; ils ne sont pas une production du hasard, et si vous prenez soin de les examiner plus minutieusement, vous trouverez que leur architecture est apte, jusqu'à un certain point, à se révéler elle-même. Ils se fendent souvent dans certaines directions sous l'action d'une lame de canif, présentant alors des faces unies et brillantes, que l'on appelle des plans de clivage; et, en suivant ces plans, vous arrivez quelquefois à une forme intérieure qui se cachait sous la forme extérieure du cristal. Méditez sur ces beaux édifices de l'architecte caché. Vous ne pourrez pas manquer de vous demander à vous-même comment ils ont été bâtis et, familiarisés comme vous l'êtes avec la notion de la force polaire et de l'aptitude de cette force à produire des arrangements de structure, votre réponse sera inévitablement que ces cristaux sont dus au jeu des forces polaires dont les molécules sont elles-mêmes douées. En vertu de ces forces, la molécule se pose à côté de la molécule d'une manière parfaitement définie, et la forme visible dernière du cristal dépend de ce jeu des molécules.

Partout, dans la Nature, nous observons cette tendance à courir vers des formes définies, et rien de plus aisé que de donner essor à cette tendance par des arrangements artificiels. Dissolvez du nitre dans l'eau, et laissez l'eau s'éva-

porer lentement, le nitre demeure et la solution devient bientôt si concentrée qu'elle ne peut pas garder plus longtemps sa forme liquide. Les molécules de nitre s'approchent l'une de l'autre, et elles finissent par céder à leurs forces polaires. Elles s'arrangent elles-mêmes sous l'empire de ces forces, et il se produit enfin un premier petit cristal de nitre. Sur ce cristal, les molécules continuent à se déposer elles-mêmes, venues du liquide environnant. Le cristal croît, et finalement nous avons de larges prismes de nitre, ayant chacun une forme parfaitement définie. L'alun cristallise avec la plus grande facilité au sein de ses solutions. Toutefois le cristal résultant diffère par sa forme de celui du nitre, parce que les pôles des molécules sont différemment disposés. Si on les *nourrit* isolément avec des soins convenables, on peut faire acquérir aux cristaux de ces substances de grandes dimensions.

La condition d'une cristallisation parfaite est que la force cristallisante puisse agir en toute liberté ; elle ne doit pas être précipitée dans ses opérations : il faut qu'il soit permis à chaque molécule d'exercer ses droits moléculaires propres sans être troublée par ses voisines. Si la cristallisation est trop soudaine, la régularité disparaît. On peut saturer l'eau de sulfate de soude en dissolvant le sel dans l'eau chaude et laissant ensuite refroidir. Froide, la solution est sursaturée, c'est-à-dire qu'elle contient une quantité de matière solide plus grande que celle qui correspond à sa température. Cependant les molécules ne manifestent aucune tendance à se grouper les unes autour des autres.

C'est là un fait très-remarquable, mais un fait très-commun. Les molécules au sein du liquide sont tellement empêchées par l'action de leurs voisines, que toute liberté de

céder à leur tendance naturelle leur est refusée. Fixez les yeux sur une des molécules de l'intérieur de la masse; elle désire s'unir à sa voisine de droite, mais elle désire autant s'unir à sa voisine de gauche; une des tendances neutralise l'autre, et elle ne s'unit avec aucune. Nous avons ici, de fait, transféré à l'action moléculaire l'hésitation de la volonté animale produite par les deux bottes de foin également tentantes; mais si l'on plonge dans la dissolution un cristal de sulfate de soude, l'indécision moléculaire cessera. Les molécules adjacentes se précipiteront immédiatement sur le cristal; d'autres molécules se précipiteront à leur tour sur les premières, et cet acte de précipitation se continuera du goulot au fond de la bouteille, jusqu'à ce que la solution ait pris autant qu'il est possible la forme solide. Les cristaux ainsi produits sont petits et arrangés d'une manière confuse. Leur groupement a été trop précipité pour qu'ils pussent se prêter à l'action pure et régulière de la force cristallisante. Il représente l'état d'une nation au sein de laquelle on résiste à un changement raisonnable et salutaire, jusqu'à ce que, la société devenant comme sursaturée du désir de changement, le changement prenne alors la forme de trouble et de révolution qu'une sage prévision aurait pu conjurer.

Rendons plus évidente la notion de la force de cristallisation par deux exemples où elle est en jeu. On pourrait employer le nitre, mais une autre substance bien connue me permettra de faire l'expérience sous une forme meilleure. Cette substance est le sel ammoniac commun, ou le chlorhydrate d'ammoniaque dissous dans l'eau. Nettoyez parfaitement une plaque de verre, versez la solution de chlorhydrate sur la plaque, à laquelle, lorsque vous la dresserez sur sa tranche, adhérera une couche mince de liquide. En

chauffant légèrement la plaque, vous hâterez l'évaporation, mais l'eau seule sera éliminée par la vaporisation. On introduit alors la plaque dans le microscope solaire, et l'on projette l'image de la couche sur un écran blanc. La chaleur du faisceau lumineux s'ajoute à celle que l'on a déjà communiquée à la plaque de verre, de sorte qu'après un ou deux instants le sel dissous ne peut plus rester à l'état liquide. La molécule alors s'unit à la molécule, et vous avez sous les yeux le spectacle très-impressionnant du jeu de l'énergie cristallisante s'exerçant sur toute la surface de la plaque. Vous pouvez produire quelque chose de semblable en faisant fondre par votre haleine les fleurs que le froid a dessinées sur les vitres de votre chambre à coucher, et observant ensuite à la loupe la régélation de la couche liquide.

Dans ce cas, la force cristallisante est gênée par l'adhérence de la couche liquide au verre; néanmoins le résultat de son action est frappant de beauté. Quelquefois les cristaux partent du bord de la couche et s'élancent de ce bord sur toute sa surface, car, la cristallisation une fois commencée, les molécules se précipitent elles-mêmes de préférence sur les cristaux déjà formés. Quelquefois la cristallisation part d'un noyau déterminé au centre de la couche, chaque petite partie cristalline restée sur la couche devenant le point de départ d'une action nouvelle; mais, pendant toute la durée de l'opération, vous constatez un trait caractéristique parfaitement inaltérable, la grandeur angulaire ou l'angle sous lequel les molécules se groupent en ligne droite. Des branches pointues s'élancent du tronc, et de ces branches d'autres s'élancent aussi en pointe; mais l'angle compris entre les branches principales ou secondaires est toujours le même. Vous verrez ce même fait se

produire dans les cristaux d'alun, dans les cristaux de quartz et dans tous les autres cristaux de formes contournées. Ils sont à la merci des accidents de cristallisation, mais ils affirment leur supériorité sur tous ces accidents par une particularité de leur structure : la *grandeur angulaire* est toujours maintenue rigoureusement.

Mon second exemple de l'action de la force cristallisante est celui-ci : en envoyant un courant électrique à travers un liquide, vous savez que nous le décomposons et que, s'il contient un métal, nous mettons le métal en liberté par l'électrolyse. Cette petite auge contient une solution d'acétate de plomb, que je choisis comme très-approprié à mon but, parce que le plomb s'abandonne librement à cette puissance cristallisante. Au sein de l'auge plongent deux fils fins de platine, et ces fils sont reliés par deux autres à une petite pile voltaïque. Si j'envoie le courant à travers la solution, le plomb se séparera lentement des molécules avec lesquelles il est actuellement combiné; il sera mis en liberté sur un des fils. Au moment de sa libération, il obéira aux forces polaires de ses molécules, et produira des formes cristallines d'une beauté exquise. Elles sont maintenant sous vos yeux, s'élançant du fil comme des feuilles de fougère, et dessinant une forme végétale avec une si grande rapidité qu'on la voit croître à vue d'œil. Si je renverse le courant, ces branches de plomb se dissoudront, tandis que de l'autre fil des filaments de plomb s'élanceront en tous sens à travers le liquide. Dans un ou deux instants la croissance de l'arbre de plomb recommence, mais elle recouvre actuellement l'autre fil.

C'est par cet acte de la cristallisation que la Nature se révèle d'abord à nous comme architecte. Où s'arrêteront ses opérations? Continuera-t-elle par le jeu des mêmes

# DESSINS EN FORME DE PLUMES

PRODUITS PAR LA CRISTALLISATION DE L'EAU.

Voir pages 113, 243 et 246.

forces à former des végétaux et des animaux? Quelle que puisse être la réponse à ces questions, croyez-moi, les notions des générations à venir sur cette chose mystérieuse que quelques-uns appellent la matière brute seront très-différentes de celles des générations passées.

Mais il serait difficile de citer un exemple plus brillant et plus instructif de ce jeu de la force moléculaire que celui qui nous est fourni par l'eau. Vous avez vu les beaux dessins en forme de feuilles de fougère produits par la cristallisation d'une couche d'eau sur une vitre refroidie (1). Vous avez aussi probablement remarqué les belles rosettes unies ensemble par la force cristallisante dans l'acte de la chute de la neige par un jour très-calme. Les pentes et les sommets des Alpes sont couverts en hiver des bouquets de ces fleurs du froid; elles varient infiniment dans les détails de leur beauté, mais la même grandeur angulaire se retrouve partout; un pouvoir inflexible enchaîne sous un même angle de 60 degrés les lances et les dards.

La glace commune de nos lacs est aussi réglée dans sa formation par ce même angle. Vous avez vu quelquefois, dans l'eau arrivée à son point de congélation, de petits cristaux de forme stellaire; chaque étoile a six rayons comprenant tous entre eux cet angle de 60 degrés. On peut mettre cette structure en évidence au sein de la glace ordinaire. Dans un rayon de soleil, ou à son défaut dans notre rayon de lumière électrique, nous possédons un instrument assez délicat pour dégager les molécules glacées sans troubler l'ordre de leur architecture. Coupons dans de la glace très-

(1) Un spécimen des dessins en forme de plumes produits par la cristallisation de l'eau figure au frontispice. On en trouvera l'explication dans l'Appendice à ces Leçons.

claire, très-pure, refroidie et congelée régulièrement, une plaque de glace parallèle aux plans de congélation, et envoyons un rayon de soleil à travers la plaque. Ce rayon la liquéfie intérieurement sur des points spéciaux, et l'on voit se former autour de chacun de ces points une fleur liquide à six pétales, d'une beauté exquise. Des masses de semblables fleurs sont ainsi produites. Nous avons quelquefois retiré d'une glacière des blocs de glace présentant des espaces nébuleux au sein d'une masse d'ailleurs continue; et lorsque nous recherchions la cause de ces nébulosités, nous trouvions qu'elle était due à des myriades de petites fleurs à six pétales, résultat de la fusion de la neige par la seule chaleur de conduction.

Consacrons encore un moment à la cristallisation de l'eau, avec la certitude d'être bien récompensés, car la somme des qualités qui rendent cette substance apte à jouer son rôle dans la Nature est bien faite pour exciter l'admiration et stimuler la pensée. Comme presque toutes les autres substances, l'eau se dilate par la chaleur et se contracte par le froid. Mettons d'abord en évidence cette dilatation et cette contraction.

Ce petit flacon est rempli d'eau colorée et fermé avec un bouchon de liége. A travers le bouchon passe un tube de verre qui ne laisse pas d'issue à l'eau qui s'élève à une certaine hauteur dans le tube. Le flacon et le tube rappellent à la fois la boule et la tige d'un thermomètre. Si l'on applique au flacon la chaleur d'une lampe à esprit-de-vin, l'eau monte dans le tube et finit par déborder autour du sommet. La dilatation par la chaleur est ainsi démontrée.

Écartant la lampe et entourant le flacon d'un mélange réfrigérant, on voit la colonne liquide s'abaisser, manifestant ainsi la contraction de l'eau par le froid; mais le mé-

lange réfrigérant continue à agir; la descente de la colonne continue jusqu'à un certain point, elle cesse alors. Le sommet de la colonne reste stationnaire pendant quelques secondes, et ensuite il commence à monter. La contraction a cessé, et la dilatation par le froid commence. Laissons la dilatation continuer jusqu'à ce que l'eau déborde une seconde fois au sommet du tube. Le mélange réfrigérant a produit, selon toute apparence, le même effet que la flamme. Dans le cas de l'eau, la contraction par le froid cesse, et la dilatation par le froid commence à une température déterminée, 4 degrés centigrades au-dessus de zéro. La cristallisation à cette température a virtuellement commencé, les molécules se préparant elles-mêmes à l'acte subséquent de solidification qui a lieu à zéro, acte dans lequel la dilatation atteint son maximum. En vertu de cette dilatation, la glace, comme vous le savez, est plus légère que l'eau dans la proportion de 8 à 9 (1).

Un problème moléculaire de grand intérêt se rattache à ces faits, et j'ai le désir, pour la satisfaction de vos esprits, de placer ici sous vos yeux sa solution possible ou probable.

---

(1) Dans un petit volume intitulé *Les formes de l'eau*, j'ai fait mention du fait que le fer froid flotte sur le fer en fusion. Visitant en compagnie de mon ami, sir William Armstrong, son usine de Elswick, en 1868, j'ai eu souvent l'occasion d'être témoin de ce fait. Faraday, je m'en souviens, me parlait plus tard du trop-plein observé dans le moulage de la fonte de fer comme dû probablement au gonflement du métal dans l'acte de sa solidification. Depuis, je n'ai donné aucune attention à ce sujet, et je sais que beaucoup de fondeurs intelligents doutent du fait de l'expansion. Il est bien possible que le fer flotte, parce qu'il n'est pas *mouillé* par la fonte, et que son volume est virtuellement augmenté par la répulsion capillaire. Certaines mouches marchent librement sur l'eau par une action de ce genre. Avec le bismuth, toutefois, il est facile de briser des bouteilles de fer par la force de sa dilatation.

Considérons donc le cas idéal d'un certain nombre d'aimants dépourvus de poids, mais retenant leurs forces polaires. Si nous avions un liquide de même poids spécifique que l'acier, nous pourrions, en faisant flotter les aimants à sa surface, réaliser notre hypothèse, car dans un semblable liquide les aimants ne pourraient ni tomber ni nager. Cela posé, le principe de la gravitation énoncé par Newton est que toute particule de matière de toute sorte attire toute autre particule avec une force qui varie en raison inverse du carré de la distance; en vertu de cette attraction de gravité, les aimants parfaitement libres de se mouvoir s'approcheront donc peu à peu l'un de l'autre.

Mais en outre de la force unipolaire de gravité, qui appartient à la matière en général, les aimants sont doués de la force bipolaire d'aimantation. Tout d'abord, cependant, les forces bipolaires n'entreront pas sensiblement en jeu. Dans cette condition, les aimants ressemblent à nos molécules d'eau, à la température, par exemple, de 20 degrés; mais enfin les aimants arrivent à être assez près l'un de l'autre pour que leurs pôles entrent en action. A partir de ce point, l'action cesse d'être seulement une attraction générale des masses. L'attraction de certains points spéciaux de la masse et la répulsion de certains autres points commencent maintenant à s'exercer, et il est facile de voir que l'arrangement des aimants, en conséquence, de l'introduction de ces nouvelles forces sera tel, qu'il exigera un plus grand espace. C'est là, je l'admets, le cas de nos molécules d'eau. Semblables aux aimants, elles s'approchent d'abord l'une de l'autre comme des *touts*. Avant d'atteindre la température de 4 degrés centigrades, les forces polaires ont sans doute commencé à agir, mais c'est à cette température que leur action balance exactement la contraction

due au froid. A des températures plus basses, et pour ce qui regarde le changement de volume, les forces polaires prédominent; mais elles sont en lutte avec la force de contraction, tant que la température de congélation n'a pas été atteinte. Les molécules alors s'unissent pour former des cristaux solides, et une augmentation considérable de volume est la conséquence immédiate de leur union.

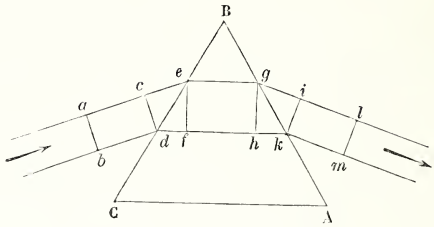
Nous avons maintenant à exposer l'influence de cet acte de la cristallisation sur les phénomènes optiques. Suivant la théorie des ondulations, la vitesse de la lumière dans l'eau et le verre est plus faible que dans l'air. Considérons donc une petite portion d'une onde issue d'un point lumineux assez distant pour que cette portion d'onde puisse être regardée pratiquement comme plane. Se mouvant verticalement de haut en bas, et venant heurter une surface horizontale de verre ou d'eau, l'onde traversera le milieu sans changement de direction; mais, comme la vitesse dans le verre et l'eau est moindre que la vitesse dans l'air, l'onde sera retardée en passant dans le milieu plus dense.

Mais supposons que l'onde, avant d'atteindre le verre, soit oblique à sa surface; celle des extrémités de l'onde qui atteint la première le milieu sera la première retardée par lui; les autres portions, à mesure qu'elles entreront dans le verre, seront retardées successivement. Il est aisé de voir que le retard subi par une extrémité de l'onde la force à tourner ou à s'incliner et à changer de front, de telle sorte que, lorsque l'onde est entrée tout entière dans le verre, sa course est oblique à sa direction première. C'est ainsi que, dans la théorie des ondulations, la lumière est *réfractée*.

Avec ces considérations pour guide, suivons la course d'un faisceau de lumière monochromatique à travers un

prisme de verre. La vitesse dans l'air est à la vitesse dans l'eau comme 2 est à 3. Soient ABC (*fig.* 28) la section de

Fig. 28.




notre prisme, et *ab* la section de l'onde plane qui s'en approche dans la direction indiquée par la flèche. Lorsqu'elle est arrivée en *cd*, une des extrémités de l'onde est sur le point d'entrer dans le verre, et pendant que la portion de l'onde qui est encore dans l'air parcourt la distance *ce*, l'onde dans le verre aura parcouru seulement les deux tiers de cette distance ou *df*. La ligne *ef* marque donc maintenant le front de l'onde. Entièrement immergée dans le verre, elle poursuit son chemin et arrive en *gh* où c'est l'extrémité *g* qui est sur le point de s'échapper dans l'air. Pendant le temps exigé par l'extrémité *h* pour passer de la distance *hk* à la surface du prisme, l'autre extrémité *g* qui se meut plus rapidement aura atteint le point *i*. L'onde, par conséquent, a de nouveau changé de front, de sorte qu'après son émergence du prisme elle viendra en *lm* et continuera son chemin dans la direction de la flèche. On explique ainsi complétement la réfraction du rayon. Cette explication est, de plus, basée sur l'expérience directe, laquelle prouve que le rapport de la vitesse de la lumière dans le verre à sa vitesse dans l'air est ce que nous avons dit. Il est évident que, si le changement de vitesse à l'entrée

dans le verre était plus grand, la réfraction serait plus grande.

Les deux éléments de la rapidité de propagation du son et de la lumière, au sein d'une substance quelconque, sont l'*élasticité* et la *densité*, la vitesse augmentant avec le premier et diminuant avec le second. L'énorme vitesse de la lumière dans l'espace stellaire a pu être atteinte, parce que l'éther a à la fois une densité infiniment petite et une élasticité énorme. Cela posé, l'éther entoure les atomes de tous les corps, mais il n'est pas indépendant d'eux. Dans la matière pondérable, il agit comme si sa densité était accrue, sans un accroissement proportionnel d'élasticité, et c'est ce qui explique la diminution de la vitesse de la lumière dans les corps réfringents. Nous voici parvenus à un point de la plus grande importance. En vertu de l'architecture cristalline que nous avons déjà étudiée, l'éther, au sein de beaucoup de cristaux, possède des densités différentes dans les différentes directions; et la conséquence est que quelques-uns de ces milieux transmettent la lumière avec des vitesses différentes. Mais comme la réfraction dépend entièrement du changement de vitesse à l'entrée du milieu réfringent, et comme elle est plus grande là où le changement de vitesse est le plus grand, nous avons, dans plusieurs cristaux, des réfractions différentes. Par de semblables cristaux, un rayon de lumière est partagé en deux. Cet effet s'appelle *double réfraction*.

Dans l'eau ordinaire, par exemple, il n'y a rien dans le groupement des molécules qui puisse altérer la parfaite homogénéité de l'éther; mais lorsque l'eau est cristallisée en glace, il en est tout autrement. Dans une plaque de glace, l'élasticité de l'éther dans une direction perpendiculaire à la surface de congélation est différente de ce qu'elle

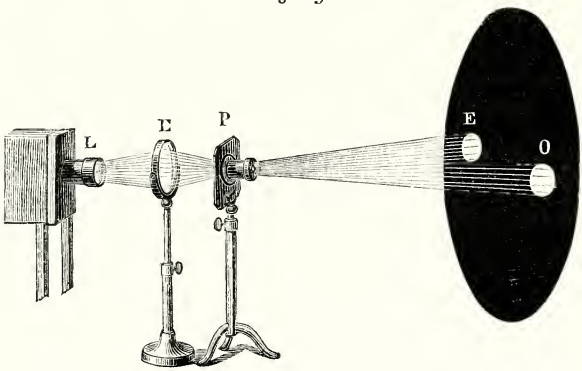
est dans la direction parallèle à la surface de congélation; la glace est, par conséquent, une substance doublement réfringente. La double réfraction se déploie d'une manière très-frappante dans le spath d'Islande, lequel est du carbonate de chaux cristallisé. La différence de densité de l'éther dans les deux directions au sein du cristal est vraiment grande, et voilà pourquoi la séparation du rayon en deux moitiés est particulièrement remarquable.

Je ne veux pas abandonner ce sujet avant de l'avoir rendu parfaitement clair à vos esprits. Les vibrations de l'éther étant transversales, l'élasticité en jeu dans la propagation de tout rayon est celle qui est à angle droit avec la direction de propagation. Dans le spath d'Islande, il est une direction autour de laquelle les molécules cristallines sont symétriquement distribuées : cette direction s'appelle l'*axe du cristal*. En conséquence de cette symétrie, l'élasticité est la même dans toutes les directions perpendiculaires à l'axe, et voilà pourquoi un rayon transmis le long de l'axe ne subit pas la double réfraction. Mais l'élasticité le long de l'axe est plus grande que l'élasticité à angle droit avec l'axe. Considérons donc un système d'ondes qui traverse le cristal dans une direction perpendiculaire à l'axe. Deux directions de vibrations s'ouvrent devant ces ondes : les particules de l'éther peuvent vibrer parallèlement à l'axe ou perpendiculairement à l'axe. *Elles font les deux*, et se partagent immédiatement en deux systèmes propagés avec des vitesses différentes. La double réfraction est la conséquence nécessaire de ce partage.

Au moyen du spath d'Islande taillé dans une direction convenable, la double réfraction peut être facilement mise en évidence. Vous voyez actuellement projetée sous vos yeux l'image de nos pointes de charbon. Faisons passer le

rayon qui projette ces images à travers le spath, l'image unique se divise instantanément en deux. En projetant à l'aide de la lentille E (*fig.* 29) une image de l'ouverture L

Fig. 29.




à travers laquelle la lumière entre dans le spath P, on voit apparaître immédiatement sur l'écran deux disques lumineux E,O, au lieu d'un.

Les deux rayons dans lesquels le spath partage le rayon unique ont été soumis à l'examen le plus attentif. Ils ne se comportent pas de la même manière. L'un des deux suit la loi ordinaire de la réfraction découverte par Snell, et s'appelle, par conséquent, *rayon ordinaire;* son indice de réfraction est 1,483; l'autre n'obéit pas à cette loi, et, de plus, son indice de réfraction n'est pas constant : il varie d'un maximum 1,654 à un minimum 1,483; le rayon incident et le rayon réfracté ne sont pas non plus toujours dans le même plan; ce rayon, par suite, a été appelé *rayon extraordinaire*. Dans le spath calcaire, comme on vient de le dire, le rayon extraordinaire est le plus réfracté. Une conséquence de ce fait mérite d'être signalée en passant. Versez de l'eau et du sulfure de carbone dans deux coupes de

même profondeur ; la coupe qui contient le liquide plus fortement réfringent apparaîtra moins profonde que l'autre. Placez un morceau de spath d'Islande sur une tache d'encre ; vous verrez deux taches, dont l'une paraîtra plus voisine de votre œil que l'autre. La tache la plus voisine appartient au rayon plus fortement réfracté, exactement comme le fond de coupe le plus voisin de l'œil appartient au liquide plus fortement réfringent. Si vous faites tourner le spath, l'image extraordinaire de la tache tourne autour de l'ordinaire, qui demeure fixe. C'est ainsi également que nos deux disques se comportent sur l'écran.

La double réfraction du spath d'Islande fut d'abord étudiée dans un ouvrage publié en 1669, par Érasme Bartholin. Le célèbre Huyghens essaya d'expliquer ces phénomènes d'après les principes de la théorie des ondulations, et il réussit à le faire. Il fit, de plus, l'observation importante des caractères distinctifs des deux rayons transmis par le spath d'Islande, tout en avouant, avec une candeur résignée, qu'il ne les a pas expliqués, et laissant la solution aux temps à venir. Newton, en réfléchissant sur les observations de Huyghens, arriva à la conclusion que chacun des deux rayons transmis par le spath d'Islande a deux côtés ; et, de l'analogie de cette *dualité de côtés* avec la *dualité d'extrémités* d'un barreau aimanté qui constitue sa polarité, il arriva consécutivement à regarder les deux rayons comme *polarisés*.

Nous étudierons avec aise et profit le sujet de la *polarisation* de la lumière à l'aide d'un cristal de tourmaline ; mais il est nécessaire que nous partions d'une conception claire d'un rayon de lumière ordinaire. Nous avons déjà expliqué comment les vibrations de chaque particule d'éther individuelle s'exécutent *transversalement* à la ligne de

propagation. Dans le cas de la lumière ordinaire, nous devons nous figurer que les particules de l'éther vibrent dans toutes les directions ou azimuts, comme on le dit quelquefois, perpendiculaires à cette ligne.

Mais, dans le cas d'une plaque de tourmaline coupée parallèlement à l'axe du cristal, le rayon de lumière qui tombe sur la plaque se divise en deux rayons vibrant l'un parallèlement, l'autre perpendiculairement à l'axe. Le groupement des molécules et de l'éther associé aux molécules réduit toutes les vibrations incidentes sur le cristal à ces deux vibrations normales. Un de ces rayons, à savoir celui dont les vibrations sont parallèles à l'axe, est éteint par la tourmaline avec une rapidité excessive. Pour de semblables vibrations, beaucoup d'échantillons de ce cristal sont fortement opaques; de sorte que, après avoir traversé une très-petite épaisseur de la tourmaline, la lumière sort avec toutes ses vibrations réduites à un simple plan. Dans cette condition, elle est ce qu'on appelle un rayon de *lumière polarisée* dans un *plan* ou *rectilignement*.

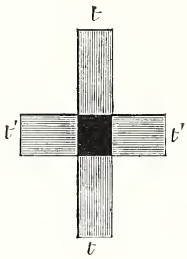
Un moment de réflexion suffit à montrer que, si ce que l'on vient de dire est correct, lorsque l'on placera sur le trajet du rayon une seconde plaque de tourmaline avec son axe parallèle à l'axe de la première, la lumière traversera les deux plaques; mais que, si les deux axes sont en croix, la lumière qui a passé à travers l'une des plaques sera éteinte par l'autre, et qu'il en résultera une interception complète de la lumière. Soumettons ces conclusions au contrôle de l'expérience. Vous avez sous les yeux (*fig.* 30) l'image d'une plaque de tourmaline *tt*. Je place parallèlement à elle une autre plaque *t't'* : le vert des cristaux devient un peu plus foncé, mais rien de plus; ceci est d'accord avec notre conclusion. Je tourne maintenant peu à peu une des

deux plaques, et vous remarquez qu'aussi longtemps que les deux plaques sont obliques l'une à l'autre il passe à travers leur double substance une certaine quantité de lumière; mais que, dès qu'elles sont à angle droit l'une sur

Fig. 30.

l'autre, l'espace commun aux deux est un espace obscur (*fig.* 31). Ici encore la conclusion à laquelle nous étions arrivés avant l'expérience se trouve vérifiée.

Fig. 31.




Revenons à une seule plaque, et cette fois laissez-moi vous dire que c'est sur la lumière verte transmise par la plaque que vous avez à fixer votre attention. Nous avons fait ressortir la dualité de côtés de cette lumière verte, en contraste avec la multiplicité infinie de côtés de la lumière ordinaire. La lumière qui entoure l'image verte étant de la lumière ordinaire, elle sera réfléchie par un miroir plan de verre dans toutes les directions; la lumière verte, au contraire, n'est pas ainsi réfléchie. La plaque de tourmaline est maintenant horizontale : sa lumière, réfléchie en haut, reste toujours verte; réfléchie latéralement, elle est réduite

à l'obscurité, à cause de l'incompétence de la lumière verte à être réfléchie dans cette direction. Si, rendant la plaque de tourmaline verticale, nous réfléchissons la lumière comme auparavant, ce sera dans l'image d'en haut qu'elle sera éteinte; dans l'image latérale, vous avez maintenant du vert. C'est un résultat de la plus haute portée. Si les vibrations de la lumière étaient longitudinales comme celles du son, vous n'auriez aucune action de ce genre, et cette action à elle seule nous force d'admettre que les vibrations sont transversales. Figurez-vous ceci clairement : dans un des cas le miroir reçoit le choc des bords (de la tranche) de l'onde, la lumière verte est alors éteinte. Dans l'autre cas, ce sont les faces (le plat) de l'onde qui frappent le miroir, et la lumière verte est réfléchie. Pour que l'extinction soit complète, il faut que la lumière tombe sur le miroir sous un angle spécial. Quel est cet angle? Je vais maintenant vous l'apprendre.

La qualité de dualité de côtés conférée à la lumière par les cristaux peut aussi lui être communiquée par la réflexion ordinaire. Malus fit cette découverte en 1808, pendant qu'il regardait à travers un spath d'Islande la lumière du Soleil réfléchie par une vitre du palais du Luxembourg. Je reçois sur une plaque de verre à vitre le rayon de notre lampe : une grande portion de la lumière réfléchie par le verre est polarisée. Les vibrations de ce rayon réfléchi sont exécutées pour la plus grande partie parallèlement à la surface du verre, et lorsque la plaque de verre est tenue de telle sorte que le rayon fasse un angle de 58 degrés avec la perpendiculaire au verre, *la totalité* de la lumière réfléchie est polarisée. C'était sous cet angle que l'image de la tourmaline était complétement éteinte dans notre première expérience. On l'appelle l'*angle de polarisation.*

Sir David Brewster a prouvé que l'angle de polarisation d'un milieu est cet angle particulier pour lequel le rayon réfracté et le rayon réfléchi comprennent entre eux un angle droit (1). L'angle de polarisation augmente avec l'indice de réfraction. Pour l'eau, il est de 52°,5; pour le diamant, de 68 degrés.

Essayons maintenant de répéter en substance l'expérience de Malus. Le rayon de la lampe est reçu sur cette plaque de verre et réfléchi à travers le spath. Au lieu de deux images, nous n'en avons qu'une; de sorte que la lumière, quand elle est polarisée, comme elle l'est actuellement, ne peut être transmise par le spath que dans une direction et, par conséquent, ne produit qu'une image. Comment cela se fait-il? Dans le spath d'Islande, comme dans la tourmaline, toutes les vibrations de la lumière ordinaire sont ramenées à deux plans à angle droit l'un sur l'autre; mais, contrairement à ce qui a lieu pour la tourmaline, les deux rayons sont transmis avec une égale facilité par le spath. Les deux rayons, en un mot, en sortant du spath sont polarisés, et les directions de leurs vibrations sont à angle droit l'une sur l'autre. Quand, par conséquent, la lumière était polarisée par la réflexion sur le verre, la direction de vibration dans le spath qui correspondait à la direction de vibration du

---

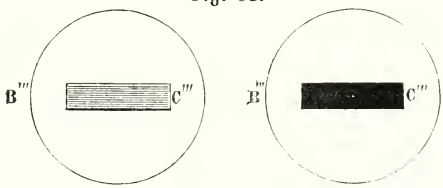
(1) Cette belle loi est ordinairement formulée ainsi :

*L'indice de réfraction d'une substance quelconque est la tangente de l'angle de polarisation.* A l'aide de cette loi, et avec un appareil semblable à celui de la figure 4, p. 16, nous pouvons déterminer sans peine l'indice de réfraction d'un liquide réfringent quelconque. Les rayons réfléchi et réfracté étant visibles, on peut les amener à comprendre un angle droit. L'angle de polarisation du liquide peut-être ainsi trouvé avec la précision la plus grande. On n'a plus qu'à chercher sa tangente naturelle pour obtenir son indice de réfraction.

rayon polarisé le transmet, et le transmet seule. Une seule image, par conséquent, est possible dans ces conditions.

Vous remarquerez maintenant qu'une logique comme celle qui enchaîne nos expériences est simplement la traduction de la logique de la Nature. Sur l'écran dressé devant vous, vous voyez deux disques de lumière produits par la double réfraction du spath d'Islande. Ce sont, comme vous le savez, deux images de l'ouverture à travers laquelle la lumière sort de la chambre. En plaçant une tourmaline en avant de l'ouverture, nous obtiendrons aussi deux images du cristal. Déduisons du raisonnement ce que nous devons attendre de cette expérience. La lumière qui émerge de la tourmaline est polarisée. Si nous plaçons le cristal avec son

Fig. 32.

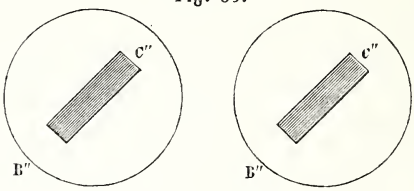



axe horizontal, les vibrations de la lumière transmise seront aussi horizontales. Cela posé, le spath, comme nous l'avons déjà établi, a deux directions de vibrations, dont l'une au moment actuel est verticale, et l'autre horizontale. Que devons-nous en conclure? Que la lumière verte sera transmise le long de la dernière direction qui est parallèle à l'axe de la tourmaline, et non le long de la première qui est perpendiculaire à cet axe. Nous pouvons inférer de là que l'une des images de la tourmaline montrera la couleur verte ordinaire du cristal, tandis que l'autre image sera noire. Éprouvé par l'expérience, ce raisonnement est vérifié à la lettre.

Poussons l'épreuve encore plus loin. A l'aide d'une vis sans fin, nous pouvons faire tourner le cristal de 90 degrés.

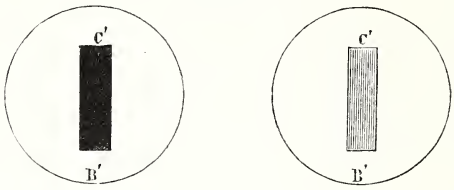
L'image noire, à mesure qu'elle tourne, devient graduellement plus claire, et l'image claire devient graduellement plus sombre; sous un angle de 45 degrés les deux images sont également claires (*fig.* 33), tandis que, lorsqu'on

Fig. 33.




atteint 90 degrés, l'axe du cristal étant alors vertical, les images brillantes et noires ont changé de place, exactement comme le raisonnement nous avait conduits à le supposer (*fig.* 34).

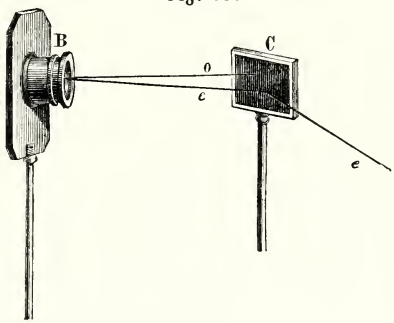
Fig. 34.




Deux rayons transmis par un spath d'Islande étant donnés, il est parfaitement manifeste qu'il est en notre pouvoir de déterminer instantanément, au moyen d'une plaque de tourmaline, les directions suivant lesquelles les particules d'éther vibrent dans les deux rayons. Le spath doublement réfringent peut être placé dans une position quelconque. Un examen minutieux fait avec la tourmaline nous mettra en état de déterminer la position qui donne une

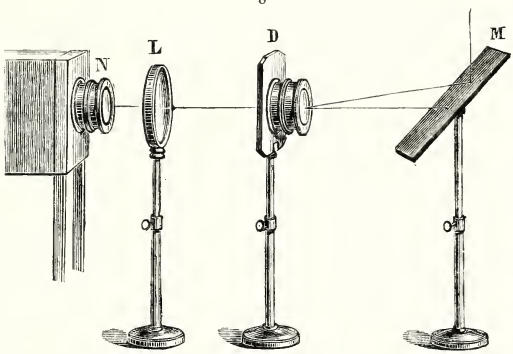
image noire et une image brillante, et de cette position une fois connue nous déduirons la direction des vibrations.

Fig. 35.




Poursuivons encore ensemble notre raisonnement. Les deux rayons issus du spath étant ainsi polarisés, il est évi-

Fig. 36.




dent que s'ils sont reçus convenablement sur une plaque de verre, placée sous l'angle de polarisation, un des deux sera réfléchi et l'autre non. C'est une simple induction de nos connaissances antérieures; or vous constatez que l'induction est justifiée par l'expérience (*fig.* 35 et 36).

J'ai dit que la totalité du rayon réfléchi par le verre sous

l'angle de polarisation est polarisée; nous pouvons maintenant ajouter un mot relatif à la portion beaucoup plus abondante de lumière qui est *transmise* par le verre. Le rayon transmis contient une quantité de lumière polarisée égale à celle du rayon réfléchi; mais cette quantité est seulement une fraction de la lumière transmise totale. En prenant deux plaques de verre au lieu d'une, nous augmentons la quantité de lumière polarisée transmise; et en prenant un faisceau ou une *pile* de plaques, nous pourrons assez augmenter leur nombre pour rendre la lumière transmise parfaitement polarisée, du moins pour tous les besoins de la pratique. En effet, des piles de glace sont souvent employées comme moyen de fournir de la lumière polarisée. En interposant une semblable pile sur le chemin des deux rayons sortant du spath d'Islande, celui de ces rayons qui dans la dernière expérience se refusait à la réflexion est maintenant transmis. Toutefois le plan de vibration de cette lumière transmise est à angle droit avec celui de la lumière réfléchie.

Encore un mot. Lorsque les tourmalines sont croisées, l'espace où elles se recouvrent l'une l'autre est noir; mais nous avons vu que la moindre obliquité dans la pose des cristaux permet à la lumière de les traverser tous les deux. Cela posé, concevons que, lorsque les deux plaques sont croisées, nous interposions entre elles une troisième plaque de tourmaline, avec son axe oblique aux deux autres. Une portion de la lumière transmise par la première plaque passera à travers la plaque intermédiaire; mais, après qu'elle a traversé cette plaque, *son plan de polarisation est changé,* il n'est plus perpendiculaire à l'axe du cristal placé en avant : elle passera donc à travers le second cristal. Nous déduisons ainsi, par le raisonnement, que l'interposition

d'une troisième plaque de tourmaline fera cesser en partie l'obscurité produite par le croisement à angle droit des deux autres plaques. Je n'ai pas ici une troisième plaque de tourmaline ; mais le mica, dont vous vous servez comme écran placé en avant de vos foyers, est une substance beaucoup plus facile à manier, et qui agit de la même manière entre les tourmalines croisées. J'introduis une lame mince de ce cristal : vous voyez que le bord de la lame descend, et qu'à mesure qu'il descend entre les tourmalines la lumière prend la place de l'obscurité. L'obscurité de fait semble effacée comme si c'était quelque chose de matériel. Cet effet a reçu naturellement, mais improprement, le nom de *dépolarisation*. Son interprétation vraie sera révélée dans notre prochaine Leçon.

# QUATRIÈME LEÇON.

Phénomènes chromatiques produits par les cristaux sur la lumière polarisée. — Le prisme de Nicol. — Polariseur et analyseur. — Action du mica et des plaques minces de sélénite. — Couleurs dépendant de l'épaisseur. — Résolution du rayon de la lumière polarisée en deux autres par la sélénite. — Un d'eux est plus retardé que l'autre. — Recomposition des deux systèmes d'ondes par l'analyseur. — Interférence rendue ainsi possible. — Production subséquente de couleurs. — Action des corps mécaniquement étirés ou pressés. — Action des vibrations sonores. — Action du verre dilaté ou comprimé par la chaleur. — Polarisation circulaire. — Phénomènes chromatiques engendrés par le quartz. — Magnétisation de la lumière. — Anneaux entourant les axes des cristaux. — Cristaux uniaxes et biaxes. — Aperçu de la théorie des ondulations. — La couleur et la polarisation de la lumière du firmament. — Génération de firmaments artificiels.

Nous voici sur le seuil d'un nouvel et splendide domaine optique. Nous avons pénétré aussi loin, peut-être, qu'il est actuellement possible d'y pénétrer, dans les arcanes de la cristallisation. En insistant sur les vrais phénomènes qui les ont révélés, nous nous sommes rendus maîtres de la conception d'un rayon de lumière rectilignement polarisée; mais je me souviens ici d'un argument que les protestants faisaient valoir quelquefois contre les catholiques. « Vous prouvez, disent-ils, l'authenticité des saintes Écritures par l'autorité de l'Église, et vous déduisez ensuite l'autorité de l'Église de celle des saintes Écritures. » Je crains de mériter moi-même un semblable reproche. Je dis que la conception de la lumière polarisée est basée sur les

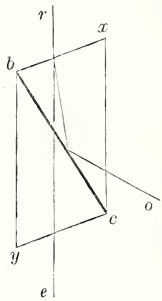
faits d'observation, et aussitôt après je procède à la déduction des faits d'observation de la conception de la lumière polarisée.

L'objection serait certainement applicable, si les conceptions théoriques étaient limitées aux faits qui leur donnent naissance. Quelques théories restent encore sous le coup de cette critique; mais aussi longtemps qu'elles le sont, elles manquent des caractères d'une vraie théorie. L'intellect scientifique ressemble à une lampe qui ne peut brûler et éclairer qu'autant qu'elle est allumée par l'allumette de l'observation ou de l'expérience; mais la lumière émise après l'ignition par l'allumette peut, en vertu de l'énergie inhérente à l'esprit, surpasser un million de fois celle de l'allumette qui lui a donné l'essor. De fait, on peut dire qu'elles sont, l'une à l'autre, dans une relation incommensurable; un petit nombre de faits groupés ou solitaires, par leur action sur l'esprit, suffisent à mettre en liberté des principes capables d'une application et d'une extension indéfinies.

Nous avons, ce soir, à mettre en évidence et à discuter les phénomènes chromatiques produits par l'action des cristaux, et plus généralement des corps doublement réfringents sur la lumière polarisée, et à les expliquer par la théorie des ondulations. Pendant longtemps les expérimentateurs furent forcés d'employer dans ce but des plaques de tourmaline, et les progrès qu'ils firent avec un moyen de recherches si défectueux sont étonnants; mais ces hommes vaillants avaient le cœur à l'ouvrage, et devenaient ainsi capables d'extraire de grands résultats de très-petites ressources instrumentales. Mais quand il s'agit d'enseigner nous avons besoin de plus grands appareils, et heureusement, dans ces dernières années, cette nécessité a été

très-largement satisfaite. Nous avons vu et examiné les deux rayons qui émergent du spath d'Islande, et nous avons prouvé qu'ils sont polarisés. Si, par le sacrifice de la moitié de la lumière, nous pouvions supprimer un de ces rayons, nous mettrions à notre disposition un faisceau de lumière polarisée incomparablement plus intense que ceux que nous pouvons obtenir avec des tourmalines.

Fig. 37.




Les deux faisceaux, vous le savez, sont différemment réfractés, et de cette différence nous sommes en état de conclure que sous certaines conditions l'un peut être totalement réfléchi sans que l'autre le soit. Un opticien habile, appelé Nicol, prenant avantage de ce fait, coupa le cristal de spath d'Islande en deux moitiés, suivant une certaine direction. Il polit les deux surfaces et les réunit de nouveau par du baume de Canada, en faisant en sorte que la surface de séparation fût assez inclinée sur le faisceau qui traverse le cristal pour que le rayon ordinaire, qui est le plus fortement réfracté, fût totalement réfléchi par la couche de baume, tandis que le rayon extraordinaire pouvait continuer sa route.

Soient *bx*, *cy* (*fig.* 37) la coupe d'un rhombe allongé de

spath d'Islande, détaché du cristal. Concevons que ce rhombe soit coupé le long de la ligne *bc*, et que les deux surfaces séparées, après avoir été polies, soient réunies par du baume de Canada. Nous avons appris dans notre deuxième Leçon que la réflexion totale prend seulement place lorsqu'un rayon cherche à passer d'un milieu plus réfringent dans un milieu moins réfringent, et que, toujours dans ces circonstances, la réflexion totale a lieu quand l'obliquité est suffisante. Cela posé, l'indice de réfraction du spath d'Islande est plus petit pour le rayon extraordinaire, et plus grand pour le rayon ordinaire que celui du baume de Canada. Par conséquent, en passant du spath dans le baume, le rayon extraordinaire passe d'un milieu moins réfringent dans un milieu plus réfringent, condition dans laquelle la réflexion totale ne peut pas se produire; tandis que le rayon ordinaire passe d'un milieu plus réfringent dans un milieu moins réfringent, condition dans laquelle la réflexion totale peut et doit avoir lieu. On assure l'obliquité requise en donnant au spath une longueur telle, que le plan dont *bc* est la section soit perpendiculaire, ou à peu près, aux deux surfaces extrêmes du rhombe *bc*, *cy*.

L'invention du prisme de Nicol a été un grand progrès dans l'optique, et tout récemment on est parvenu à construire des prismes de dimensions assez grandes pour qu'on puisse rendre un auditoire comme celui-ci témoin des phénomènes chromatiques de la lumière polarisée dans des proportions qu'on n'aurait pas pu atteindre auparavant. Les deux prismes placés sous vos yeux appartiennent à mon excellent ami M. William Spottiswoode, et ils ont été construits par M. Ladd. J'ai avec moi une autre paire de prismes encore plus grands que ceux-ci, et qui ont été façonnés pour moi par M. Browning, qui s'est fait une répu-

tation si grande et si bien méritée dans la construction des stéréoscopes [1].

Ces deux prismes de Nicol jouent le même rôle que les deux plaques de tourmaline. Quand ils sont placés l'un en avant de l'autre avec leurs directions de vibrations parallèles, la lumière les traverse tous deux; tandis que, lorsque ces deux directions sont à angle droit ou croisées, la lumière est éteinte. Dès que j'introduis une lame de mica entre les deux prismes, la lumière est rétablie; mais remarquez-le, lorsque la lame de mica est *mince*, vous avez quelquefois, non pas seulement de la lumière, mais de la lumière *colorée*. Notre besogne, pour un certain temps, consistera dans l'examen de ces sortes de couleurs. Dans ce but, j'ai recours à un cristal type du genre, très-facile à manier, parce qu'il se laisse cliver avec la plus grande facilité, le gypse ou sélénite, sulfate de chaux cristallisé. Entre les Nicols croisés, je place une plaque épaisse de ce cristal, comme le mica, il rétablit la lumière, mais sans produire de couleurs. Avec mon canif, j'enlève du cristal une écaille mince et je la place entre les deux prismes; l'image de l'écaille brille des plus riches couleurs. En faisant tourner le prisme de devant, je fais pâlir et disparaître ces couleurs; mais, en continuant de tourner jusqu'à ce que les plans de vibration soient parallèles l'un à l'autre, je fais surgir des couleurs vives, et ces couleurs sont complémentaires des premières.

Quelques portions de l'écaille revêtent une certaine couleur, d'autres en revêtent une autre. Ces différences sont dues aux épaisseurs différentes de la couche. Comme dans

---

[1] Les prismes les plus gros et les plus purs faits jusqu'ici ont été récemment construits pour M. Spottiswoode par MM. Tisley et Spiller.

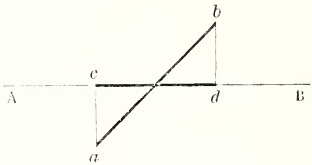
le cas des plaques minces de Hooke, si l'épaisseur est uniforme, la couleur sera uniforme. Voici, par exemple, une plaque de forme stellaire, dans laquelle chaque losange de l'étoile est une lame mince de gypse d'épaisseur uniforme ; et, vous le voyez, chacun de ces losanges brille d'une couleur uniforme. Il est facile de combiner la forme de nos plaques de manière à figurer des fleurs, des papillons ou d'autres objets, tout en colorant ces objets de nuances que l'art ne saurait pas imiter. Voici, par exemple, un échantillon de pensée dont les couleurs défient sûrement le talent de l'artiste le plus habile. En faisant tourner le prisme de Nicol de 90 degrés, nous passons, en traversant une phase sans couleur, à une série de couleurs complémentaires des premières. Ce changement à vue est encore plus frappant pour cette branche de rosier qui se montre actuellement avec ses teintes naturelles, une fleur rouge et des feuilles vertes ; je tourne le prisme de 90 degrés, et j'obtiens une fleur verte avec des feuilles rouges. Tous ces merveilleux effets chromatiques ont dans le mouvement de l'éther des causes mécaniques nettement définies. Le principe des interférences bien appliqué et interprété les explique tous.

Vous avez appris par tout ce qui précède que le mot *lumière* peut être employé dans deux sens différents : il peut signifier l'impression faite sur notre conscience, ou il peut signifier l'agent physique qui cause cette impression. C'est de cette cause que nous avons maintenant à nous occuper. Cet agent est une substance qui remplit tout l'espace et entoure les atomes et les molécules des corps. Ce milieu interstellaire et intra-atomique est doué de propriétés mécaniques définies, et nous le trouvons dans nos raisonnements et nos calculs comme un corps doué de ces proprié-

tés. En Mécanique, nous avons la composition et la décomposition des forces et des mouvements, qui s'étendent tout naturellement à la composition et à la décomposition des *vibrations*. Nous traitons l'éther lumineux d'après les principes de la Mécanique, et des compositions, des décompositions et des interférences de ses vibrations, nous déduisons tous les phénomènes déployés par les cristaux dans la lumière polarisée.

Prenons pour exemple le cristal de tourmaline, avec lequel nous sommes déjà si familiarisés. Faisons en sorte qu'une vibration traverse ce cristal obliquement à son axe. L'expérience nous a montré qu'une partie de la lumière est réellement transmise. Nous déterminerons de cette manière quelle est la quantité de lumière qui passe : soient AB (*fig.* 38)

Fig. 38.




l'axe de la tourmaline, et *ab* l'amplitude de la vibration éthérée avant qu'elle atteigne AB. De *a* et *b* abaissons deux perpendiculaires *ac* et *bd* sur l'axe; *cd* sera alors l'amplitude de la vibration transmise.

Dans un moment, je vous prierai de me suivre, lorsque je m'efforcerai d'expliquer l'effet observé quand on place une couche de gypse entre les deux prismes de Nicol. Mais, au départ, il est désirable que nous établissions mieux encore l'analogie entre l'action des prismes et celle des deux plaques de tourmaline. Vous avez sous les yeux l'image amplifiée de deux de ces plaques avec leurs axes à angle

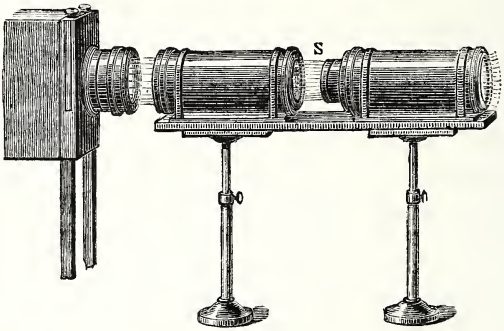
droit l'un sur l'autre. J'introduis entre elles une lame de sélénite, et vous voyez qu'en faisant tourner la plaque sur elle-même je puis la placer dans une position telle, qu'elle ne puisse plus faire cesser l'obscurité des deux portions superposées des deux tourmalines. Comment cela peut-il être? La réponse est que, dans le gypse, il y a deux directions à angle droit l'une sur l'autre, dans lesquelles seules des vibrations peuvent se produire, et que, dans notre expérience actuelle, de ces deux directions une est parallèle à l'un des axes de nos tourmalines, l'autre perpendiculaire à l'autre axe. Lorsque cela a lieu, la couche n'exerce pas d'action sensible sur la lumière. Mais, maintenant, je tourne la lame de manière à rendre ses directions de vibration obliques aux deux axes; et vous voyez aussitôt qu'elle a le pouvoir, mis en évidence dans notre dernière Leçon, de restaurer la lumière.

Montons maintenant nos prismes de Nicol, et mettons-les en croix, comme nous faisions des tourmalines. J'introduis entre eux la lame de gypse, et vous constatez que, dans une position particulière, elle n'exerce absolument aucune action sur le champ de vision; mais, lorsque je fais tourner la lame d'un petit angle, la lumière passe. Nous avons maintenant à comprendre le mécanisme par lequel cet effet est produit.

Nous avons donc d'abord ce premier prisme qui reçoit la lumière de la lampe électrique, et que l'on appelle le *polariseur*. Nous avons ensuite la plaque de gypse que nous supposons placée en S (*fig.* 39), et enfin le prisme de devant que l'on appelle *analyseur*. A sa sortie du premier prisme, la lumière est polarisée, et, dans le cas que nous considérons, ses vibrations s'exécutent dans le plan horizontal. Traçons les deux lignes rectangulaires

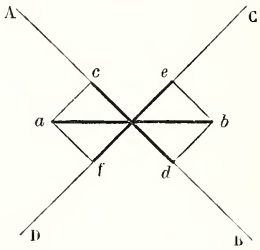
AB, OD (*fig.* 40), pour représenter les directions des vibrations au sein du gypse. Représentons par la ligne *ab* l'amplitude de la vibration sortant du premier Nicol, au

Fig. 39.




moment où elle atteint le gypse. Abaissons des deux extrémités de cette ligne des perpendiculaires sur chacun des bras de la croix; alors les distances *cd*, *ef* entre les pieds

Fig. 40.




de ces perpendiculaires représenteront les amplitudes des vibrations rectangulaires, *composantes de la première vibration unique*. Ainsi un rayon polarisé, lorsqu'il entre dans le gypse, se résout en deux autres équivalents, vibrant à angle droit l'un sur l'autre.

Cela posé, dans une de ces directions rectangulaires des vibrations, l'éther au sein du gypse est plus lent que dans l'autre, et, par conséquent, les ondes qui suivent cette direction sont plus retardées que dans les autres. Les ondes, dans les deux cas, sont raccourcies à leur entrée dans le gypse; mais les ondes de l'un des systèmes sont plus raccourcies que celles de l'autre. Vous pouvez facilement imaginer que, de cette manière, un système d'ondes puisse être en avance sur l'autre d'une demi-longueur d'onde ou d'un nombre quelconque de demi-longueurs d'onde. La possibilité des interférences éclate tout aussitôt à votre esprit. Une petite considération, cependant, rendra pour vous évident qu'aussi longtemps que les vibrations s'exécuteront à angle droit l'une sur l'autre elles ne pourront pas s'éteindre l'une l'autre, quel que puisse être le retard ou l'avance; cela nous amène naturellement au rôle joué par l'analyseur, dont la seule fonction est de recomposer les vibrations à leur sortie du gypse.

Il les ramène à un seul plan, où, si l'une d'elles est retardée de la quantité convenable, l'extinction aura lieu.

Mais ici, comme dans le cas des lames minces, les longueurs différentes des ondes lumineuses entrent en jeu. Le rouge exigera une plus grande épaisseur que le bleu pour produire le retard nécessaire à l'extinction. Conséquemment, si les plus longues ondes ont été éteintes par l'interférence, les ondes courtes resteront, et la lame de gypse brillera de la couleur qu'elles lui confèrent. Inversement, si les ondes plus courtes ont été éteintes, l'épaisseur est telle que les plus longues demeurent. Une considération élémentaire suffit à montrer que, lorsque les directions de vibration des prismes et du gypse comprennent entre elles un angle de 45 degrés, les couleurs sont à leur maximum

d'éclat. Quand on a fait tourner la plaque à partir de cette direction, les couleurs pâlissent graduellement jusqu'à ce qu'elles disparaissent, entièrement au point où les directions sont devenues des parallèles.

Peut-être que la meilleure manière d'arriver à la connaissance de ces phénomènes est de construire un modèle en bois mince ou en carton représentant la plaque de gypse, ses plans de vibration et aussi ceux du polariseur et de l'analyseur. Les pièces parallèles du carton devront être séparées par un intervalle qui devra représenter l'épaisseur de la couche de gypse. Entre elles, deux autres pièces se coupant l'une l'autre à angle droit figureront les plans de vibration au sein de la couche; tandis que, attachées aux deux surfaces parallèles extérieures, deux autres pièces de bois représenteront les sens de vibration du polariseur et de l'analyseur. Sur les deux plans qui se coupent, on tracera les ondes résultant de la décomposition en deux autres du premier faisceau polarisé et aussi la réduction subséquente par l'analyseur des deux systèmes de vibrations transmises à un plan commun. En suivant attentivement l'action mutuelle des deux systèmes d'ondes, nous apprendrons par ce modèle que tous les phénomènes de couleur obtenus par la combinaison de deux ondes, lorsque les plans de vibration des deux Nicols sont parallèles, sont remplacés par des phénomènes complémentaires, lorsque les deux Nicols sont perpendiculaires l'un à l'autre.

Dans l'examen de ce dernier point, nous opérerons, pour plus de simplicité, avec de la lumière monochromatique, avec la lumière rouge par exemple, que l'on obtient aisément pure par absorption. Supposons qu'une certaine épaisseur produise un retard d'une demi-longueur d'onde; une épaisseur double produira un retard de deux demi-lon-

gueurs d'onde; une épaisseur triple, un retard de trois demi-longueurs d'onde, et ainsi de suite. Cela posé, si les deux Nicols sont parallèles, le retard d'une demi-longueur d'onde ou d'un nombre *impair* quelconque de demi-longueurs d'onde produit l'extinction; d'un autre côté, à toutes les épaisseurs qui correspondent à un retard d'un nombre *pair* de demi-longueurs d'onde, ces deux rayons s'ajoutent l'un à l'autre lorsqu'ils sont ramenés par l'analyseur à un plan commun. Supposons donc que nous prenions une plaque en forme de coin, qui devienne graduellement plus épaisse du bord au dos, nous devons nous attendre, dans la lumière rouge, à voir naître des bandes alternatives de lumière et d'obscurité; les bandes noires correspondant à des épaisseurs qui causent des retards d'une, trois, cinq, etc. demi-longueurs d'onde, tandis que les bandes brillantes s'interposent entre les bandes obscures. L'expérience prouve que la lame en forme de coin fait naître réellement ces bandes. Elles sont aussi reproduites d'une manière très-belle par une lame circulaire, entaillée de manière à être plus mince au centre, et à augmenter graduellement d'épaisseur du centre à la circonférence. On obtient ainsi une série splendide d'anneaux alternativement lumineux et obscurs.

Si, au lieu d'employer la lumière rouge, nous employons la lumière bleue, les anneaux se montrent encore; mais, comme ils se montrent dans des portions plus minces de la couche, ils sont plus petits que les rayons obtenus avec la lumière rouge. Nous pouvons maintenant prévoir ce qui arrivera quand on emploiera la lumière blanche. Par cela même que les lumières rouge et bleue tombent en des lieux différents, nous aurons des rayons colorés des couleurs de l'iris, quoique produits avec la lumière blanche.

Quelques-uns des effets chromatiques produits par les

cristallisations irrégulières sont extrêmement beaux. Si je pouvais introduire entre les deux Nicols un morceau de vitre recouvert de ces fougères de glace que la saison froide rend maintenant si fréquentes, il en résulterait de très-riches couleurs. Les beaux effets de la cristallisation irrégulière sur plaques de verre de l'acide tartrique et d'autres substances semblables, que je mets maintenant sous vos yeux, vous donneront une idée de ce que vous pourriez attendre de la vitre recouverte de givre. Ce ne sont pas seulement les corps cristallisés qui agissent sur la lumière : il en est de même de presque tous les corps en possession d'une structure définie. En règle générale, les corps organiques agissent de cette manière; car leur architecture implique un mode d'arrangement des molécules et de l'éther qui entraîne la double réfraction. Une lamelle de corne ou la coupe d'une coquille, par exemple, manifestent de très-belles couleurs dans la lumière polarisée. Au sein d'un arbre, l'éther possède nécessairement différents degrés d'élasticité le long des fibres et transversalement aux fibres; et, si le bois était transparent, cette particularité de structure moléculaire se révélerait infailliblement elle-même par des phénomènes de polarisation chromatique, semblables à ceux que vous avez vus. Mais ce ne sont pas seulement les corps naturels qui se comportent de cette manière; on peut, comme l'a montré Brewster, par une traction ou une pression temporaire, faire participer à la structure de double réfraction les corps non cristallisés, comme le verre.

C'est là un point qui mérite éclaircissement. Si j'appuie cette barre de bois contre mon genou, et que j'essaye de la rompre, quelle est la condition mécanique de la barre? Elle se courbe; sa surface extérieure est *étirée* longitu-

dinalement, et la surface concave, celle qui touche mon genou, est *pressée* longitudinalement. Mais, dans la portion étirée comme dans la portion comprimée, l'éther est amené à une condition qui rendrait le bois, s'il était transparent, doublement réfringent; car, dans des cas semblables au présent, l'étirement longitudinal des molécules est toujours accompagné de leur rapprochement latéral, tandis que le tassement longitudinal est accompagné d'un retrait latéral. Chaque moitié de la barre subit cette antithèse et devient par conséquent doublement réfringente.

Répétons cette expérience sur une barre de verre. Entre les prismes croisés de Nicol j'introduis une semblable barre. Par le résidu de lumière confuse que lèche l'écran, vous voyez l'image du verre; mais il n'a aucune action sur la lumière. Je courbe simplement le verre par la pression de l'index et du pouce, en rendant sa longueur oblique à la direction des vibrations des Nicols : tout aussitôt la lumière jaillit sur l'écran. Les deux côtés de la barre sont illuminés; ils le sont plus sur les bords, car là la tension et la pression sont les plus grandes. En passant de la traction longitudinale à la pression longitudinale, nous traversons une portion du verre où ni l'une ni l'autre n'existe. Cette région s'appelle la région neutre de la barre de verre et le long de cette région vous apercevez une bande sombre, indiquant que le verre, dans la direction de son axe, n'exerce pas d'action sur la lumière. En employant la force d'une presse, au lieu de la force de l'index et du pouce, on augmente grandement l'éclat de la lumière.

Maintenant je prends une plaque carrée de verre que l'on peut insérer dans une presse d'une autre sorte. J'introduis entre les prismes la plaque carrée de verre non comprimée; elle déclare sa neutralité; il est cependant difficile de

lui laisser dans la presse assez de liberté pour empêcher son action de se manifester d'elle-même. Déjà, quoique la pression soit infinitésimale, vous apercevez de la lumière aux points où la presse est en contact avec le verre. Je tourne maintenant la vis. Aussitôt l'image du carré de verre ressort brillante sur l'écran, et les espaces lumineux se montrent séparés l'un de l'autre par des bandes sombres.

Chaque couple d'espaces lumineux adjacents est dans des conditions mécaniques opposées. Sur un des côtés de la bande sombre, nous avons de la tension, tandis que la bande, obscure entre les deux, marque l'axe neutre. Je serre encore, et vous voyez apparaître les couleurs, aussi richement que lorsqu'il s'agissait d'un cristal. Dès que je desserre la vis, les couleurs s'évanouissent subitement; en serrant soudainement, je les fais reparaître. Newton a pu déduire des couleurs de la bulle de savon l'épaisseur de son enveloppe, unissant ainsi par le lien de sa pensée des choses en apparence très-étrangères. Des couleurs que je vous présente ici, je puis conclure la grandeur de la pression que j'ai mise en jeu. Feu M. Wertheim, de Paris, a effectivement inventé, pour la détermination des tractions et des pressions par les couleurs de la lumière polarisée, un instrument qui l'emporte de beaucoup, par l'exactitude, sur tous les instruments employés antérieurement.

Vous savez que les cristaux sont dilatés par la chaleur et contractés par le froid. Lorsque la chaleur est employée avec une uniformité parfaite, aucune traction ou pression locale n'entre en jeu; mais, si l'on chauffe une portion d'un solide sans chauffer les autres, la dilatation de la portion chauffée introduit des tractions et des pressions qui, soumises à l'épreuve de la lumière polarisée, se révèlent d'elles-mêmes. Quand je place entre les Nicols un carré de verre à vitre

commun, vous voyez son contour obscur, mais il n'exerce aucune action sur la lumière polarisée. Tenez-le pour un moment sur la flamme d'une lampe à esprit-de-vin et introduisez-le entre les Nicols, la lumière jaillit sur l'écran. Ici, comme dans le cas de l'action mécanique, vous voyez l'espace lumineux où s'exerce la traction séparé par un axe neutre de l'espace où s'exerce la pression.

Appliquons la chaleur plus symétriquement. Ce petit carré de verre est percé à son centre, et j'introduis dans le trou un morceau de fil de cuivre. Je place le carré entre les prismes, et je chauffe le fil de cuivre. La chaleur passe par conduction au verre, au sein duquel elle se répand du centre à la circonférence. Vous voyez alors une croix obs-

Fig. 41.

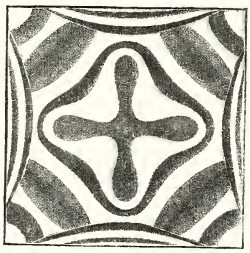
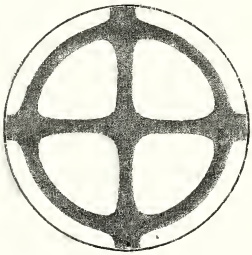


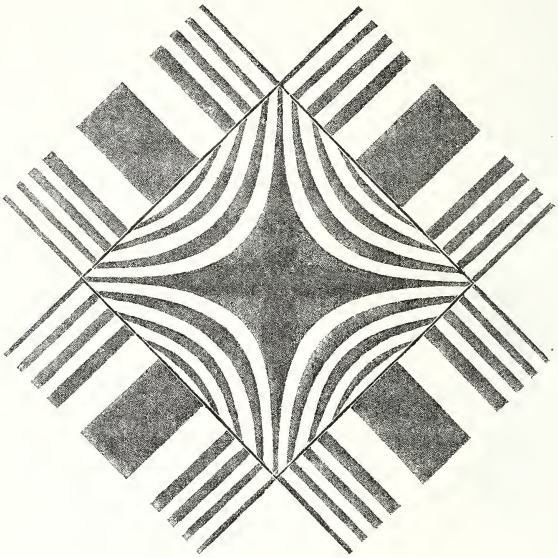
Fig. 42.



cure encadrant quatre carrés lumineux, s'étendant de plus en plus, et devenant en apparence de plus en plus noirs, en comparaison de l'éclat adjacent; et de même que, dans le cas de la pression, nous produisions des couleurs, nous obtenons des effets chromatiques splendides par une application convenable de la chaleur. La condition nécessaire à la production de ces couleurs peut être rendue permanente en chauffant d'abord suffisamment le verre et le refroidissant ensuite, de sorte que la masse refroidie et trempée reste dans

un état de traction et de pression. Deux exemples mettront le fait parfaitement en évidence. Les *fig.* 41 et 42 représentent les figures obtenues avec deux morceaux de verre ainsi préparés. Deux pièces rectangulaires de verre trempé, croisées et placées entre le polariseur et l'analyseur, montrent les belles franges irisées représentées dans la *fig.* 43.

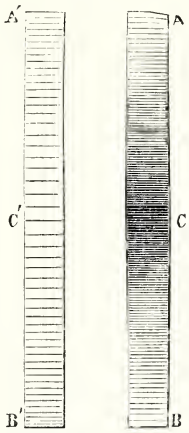
Fig. 43.



Nous avons maintenant à éclairer ces considérations d'un dernier jour. On peut mettre en jeu la lumière polarisée de diverses manières, en tant qu'analyseur de l'état moléculaire. Elle peut, par exemple, servir à révéler la condition d'un corps solide, lorsqu'il devient sonore. Cette bande de verre, de 2 mètres de longueur, de 5 centimètres de largeur, de 8 millimètres d'épaisseur, est pincée à son centre, entre l'index et le pouce. Sur l'une de ses moitiés,

je passe un chiffon de laine humide; vous entendez un son aigu dû aux vibrations du verre. Quelle est la condition de ce verre pendant qu'il fait entendre le son? Celle-ci : ses deux moitiés s'allongent et se raccourcissent dans une succession rapide; mais, au centre, les pulsations des deux extrémités se rapprochent et s'éloignent alternativement. Entre ces deux actions opposées, le verre, au centre, est

Fig. 44.

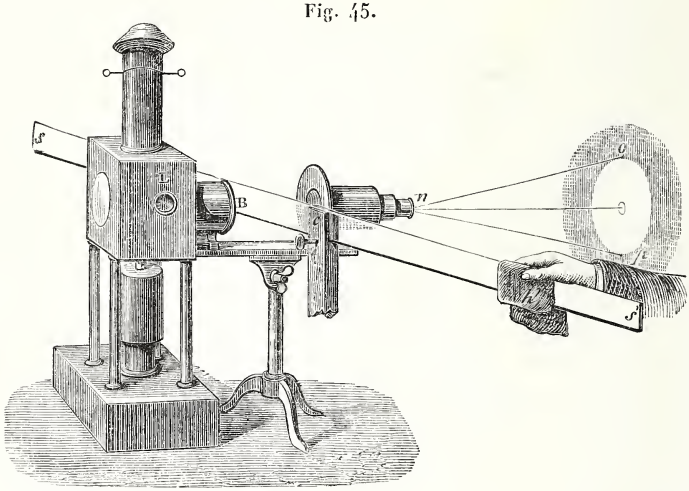



maintenu en repos; mais, d'un autre côté, il est alternativement étiré et comprimé. L'état de ce verre peut être mis en évidence par une succession de taches et de lumières, comme la propagation d'une impulsion sonore a été mise en évidence dans notre seconde Leçon. Par un simple arrangement mécanique, on fait que les taches soient animées d'un mouvement de va-et-vient : les points extrêmes ont les plus grandes amplitudes de vibration; tandis que les points du centre sont alternativement rapprochés et écartés les uns des autres, le centre restant tout à fait au repos. AB (*fig.* 44) représente le rectangle de verre avec son

centre condensé ; A′B′ représente ce même rectangle avec son centre raréfié. Les extrémités de la bande ne subissent ni condensation ni raréfaction.

Si nous introduisons la bande de verre SS (*fig.* 45) entre les prismes de Nicol croisés, en prenant soin de la rendre oblique aux directions de vibration des Nicols, et que nous frottions le verre avec notre drap humide, nous

Fig. 45.




pouvons espérer voir se produire cet effet. A chaque instant de compression la lumière brillera à travers le verre, à chaque instant de traction la lumière brillera encore, et tous ces états de traction et de pression se succéderont avec tant de rapidité, que nous pouvons croire qu'il en résultera pour notre œil une impression lumineuse permanente. Nous arrivons, par conséquent, par le simple raisonnement, à cette conclusion, que la lumière sera revivifiée aussi longtemps que le verre résonnera. L'expérience constate qu'il en est ainsi : à chaque glissement du frotteur, un

disque lumineux délicat *o* brille sur l'écran. On peut modifier l'expérience de cette manière. Plaçons en avant du polariseur une plaque de verre trempé; nous avons une série de beaux anneaux colorés, intersectés par une croix noire. Chaque passage du frotteur non-seulement efface les anneaux, mais introduit un anneau complémentaire, la croix noire se trouvant supplantée pour un moment par une croix blanche. C'est une modification de la brillante expérience que nous devons à M. Biot. Mais son appareil ne montrait le phénomène qu'à un seul observateur.

Nous avons maintenant à suivre l'éther jusque dans ses recoins les plus cachés. Vous voyez suspendu devant vous un pendule qui, lorsqu'il est soulevé d'un côté et mis en liberté, oscille animé d'un mouvement de va-et-vient. Si, lorsque le pendule passe au milieu de sa course, je lui imprime une impulsion tendant à le faire aller à angle droit de sa première course, qu'arrivera-t-il ? Les deux impulsions se composeront en une vibration unique oblique à la direction de la première, mais le pendule continuera à osciller dans un *plan*. Si, au contraire, on imprime l'impulsion rectangulaire au pendule, quand il est à la limite de son excursion, les deux impulsions composantes feront que la boule suspendue décrira non plus une ligne droite, mais une ellipse; et, si le choc est apte à produire par lui-même une vibration de même amplitude que la première, l'ellipse deviendra un cercle.

Pourquoi ai-je dû m'appesantir sur ces détails ? Simplement pour vous faire mieux connaître la ressemblance entre les grandes vibrations mécaniques et les vibrations de la lumière. Je tiens à la main une plaque de quartz taillée perpendiculairement à son axe. Le cristal ainsi taillé possède le pouvoir extraordinaire de faire tourner le plan de

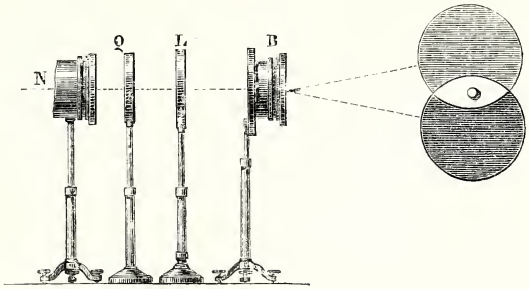
vibration du rayon polarisé d'une quantité angulaire qui dépend de son épaisseur ; et plus la lumière est réfrangible, plus la quantité de rotation est grande, de sorte que, si l'on emploie de la lumière blanche, ses couleurs constituantes seront séparées. Si je place le quartz entre le polariseur et l'analyseur, vous voyez un rouge splendide et, pendant que je fais tourner l'analyseur placé en avant de droite à gauche, les autres couleurs apparaissent successivement. On a trouvé des espèces de quartz qui exigent que l'analyseur soit tourné de gauche à droite pour obtenir la même succession de couleurs. Les cristaux de la première classe s'appellent en conséquence *dextrogyres,* et les cristaux de la seconde *lévogyres*.

Doué d'une sagacité profonde, Fresnel, au génie duquel nous devons principalement l'extension et le triomphe final de la théorie ondulatoire de la lumière, reproduisit mentalement le mécanisme de ces cristaux, et montra que leur action est due à cette circonstance que dans leur sein les ondes de la lumière agissent l'une sur l'autre de manière à reproduire la condition représentée par notre pendule en rotation. Au lieu d'être polarisée rectilignement, la lumière, dans le cristal de roche, est *polarisée circulairement*. Deux semblables rayons transmis le long de l'axe du cristal, et tournant dans des directions opposées lorsqu'on les fait interférer par l'analyseur, sont, la démonstration en a été faite, aptes à produire tous les phénomènes observés.

J'abandonne maintenant l'analyseur, et je mets à sa place le morceau de spath d'Islande avec lequel nous avons déjà mis en évidence la double réfraction. Les deux images des pointes de charbon sont actuellement sous vos yeux, produites, comme vous le savez, par des faisceaux vibrant à angle droit l'un par rapport à l'autre. J'introduis une plaque

de quartz entre le polariseur et le spath; les deux images brillent de couleurs complémentaires. En employant l'image d'une ouverture circulaire au lieu de celle des pointes de charbon, nous avons deux cercles colorés. A mesure qu'on fait tourner l'analyseur, les couleurs passent à travers diverses nuances; mais elles sont toujours complémentaires l'une de l'autre : lorsque l'une est rouge, l'autre est verte; lorsque l'une est jaune, l'autre est bleue. Nous sommes maintenant en mesure de démontrer de nouveau une assertion

Fig. 46.




de notre première Leçon, celle que, quoique le mélange des pigments bleu et jaune produise du vert, le mélange des lumières bleue et jaune produit du blanc (*fig.* 46).

N est l'ouverture de la lanterne, Q la plaque de quartz. L une lentille, et B le spath biréfringent. Les deux images empiètent l'une sur l'autre en O et produisent du blanc pur sans mélange.

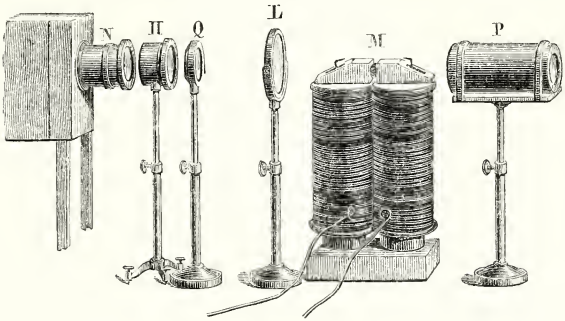
Ceci nous amène à un point de nos recherches que l'on étudie rarement dans les leçons publiques, et qui est néanmoins de nature à modifier si profondément le cours à venir de la pensée scientifique, qu'il m'est impossible de le passer sous silence. Je fais allusion à l'expérience que Faraday, qui l'a découverte, a appelée la *magnétisation de la lu-*

*mière*. L'arrangement pris pour cette célèbre expérience est maintenant sous vos yeux. Nous avons d'abord notre lampe électrique, puis un prisme de Nicol pour polariser le faisceau qui sort de la lampe, ensuite un électro-aimant, un second prisme de Nicol, et enfin l'écran. Actuellement les prismes sont croisés et l'écran est sombre. Je place entre les deux pôles de l'électro-aimant un cylindre d'une sorte particulière de verre, fabriqué d'abord par Faraday, et appelé *verre pesant de Faraday*. Le faisceau sorti du polariseur traverse maintenant le verre; après qu'il a été intercepté par le prisme de Nicol, destiné à polariser le rayon émis par la lampe, j'excite l'aimant, et aussitôt la lumière apparaît sur l'écran. Par un examen attentif nous trouvons que, en vertu de l'action exercée par l'aimant sur l'éther tenu dans le verre pesant, le plan de vibration du rayon contourne, rendant ainsi la lumière apte à traverser l'analyseur.

Nous avons déjà mentionné les deux classes dans lesquelles se divise le cristal de roche. Je tiens dans la main une plaque composée, dont une moitié est prise dans un cristal dextrogyre, et l'autre moitié dans un cristal lévogyre. Plaçant cette plaque en avant du polariseur, je tourne un des prismes de Nicol jusqu'à ce que les deux moitiés de la plaque montrent une couleur puce ou lie de vin. Cette teinte nous offre un moyen extrêmement sensible de rendre visible l'action de l'électro-aimant sur la lumière. En faisant tourner soit le polariseur, soit l'analyseur, du plus petit angle, l'uniformité des teintes disparaît, et les deux moitiés de quartz montrent des couleurs différentes. L'électro-aimant produit aussi cet effet. Le cercle lie de vin, à teinte sensible, est devant vos yeux sur l'écran (*voir* la *fig.* 47, dans laquelle N est l'ouverture de lanterne, H le

premier prisme de Nicol, Q la plaque de quartz, L une lentille, M l'électro-aimant avec le verre pesant entre ses pôles, et P le second prisme de Nicol). Quand j'excite l'aimant, une des moitiés de l'image devient subitement rouge et l'autre moitié verte. J'interromps le courant, les deux couleurs s'effacent, et la teinte sensible primitive est rétablie. L'action, en outre, dépend de la polarité de l'aimant, ou, en d'autres termes, de la direction du courant qui en-

Fig. 47.




toure l'aimant. Le rouge était premièrement à droite et le vert à gauche; le vert est maintenant à droite et le rouge à gauche. Faraday a analysé toutes ces actions avec une sagacité exquise, et établi leurs lois. Cette expérience cependant fut pendant longtemps plutôt une curiosité scientifique qu'un germe fécond. Faraday était profondément convaincu qu'elle donnerait des fruits de la plus haute importance, et des recherches récentes sont en train de vérifier sa conviction.

Quelques mots de plus sont nécessaires pour compléter nos connaissances sur la merveilleuse action mutuelle des molécules pondérables et de l'éther interposé entre elles.

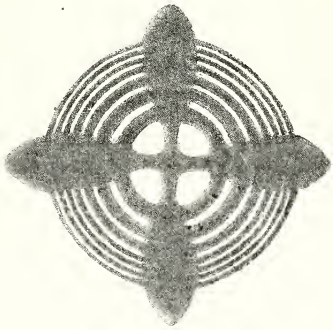
La symétrie de l'arrangement moléculaire implique la symétrie d'arrangement de l'éther; la dissymétrie atomique, d'un autre côté, entraîne la dissymétrie de l'éther, et, par conséquent, la double réfraction. Dans certains autres cristaux, les molécules sont arrangées symétriquement autour d'une certaine ligne, et non autour d'autres lignes. Le long des premières, par conséquent, le rayon ne se divise pas, tandis que le long des autres il se divise. La glace, par exemple, nous offre un exemple familier de cette disposition : les molécules sont distribuées avec une symétrie parfaite autour des perpendiculaires au plan de congélation et un rayon envoyé à travers la glace dans cette direction n'est pas doublement réfracté, tandis qu'il l'est dans toutes les autres directions. Le spath d'Islande est un autre exemple du même genre : ses molécules sont disposées symétriquement autour de la ligne qui unit les deux angles obtus opposés du rhombe. Dans cette direction, un rayon ne subit pas la double réfraction, il la subit dans toutes les autres. La direction de non double réfraction est appelée l'*axe du cristal*.

Il en résulte que, si l'on coupe dans un cristal de spath d'Islande une plaque perpendiculaire à l'axe, tous les rayons qui traverseront la plaque dans la direction de l'axe ne produiront qu'une image ; mais, du moment qu'on s'écarte du parallélisme avec l'axe, la double réfraction se produit. Si, par conséquent, on fait qu'un faisceau de lumière rendu conique à l'aide d'une lentille convergente traverse le spath, de telle sorte que le rayon central du cône passe le long de l'axe, ce rayon central échappera seul à la double réfraction. Chacun des autres sera partagé en un rayon ordinaire et un rayon extraordinaire, l'un se mouvant plus lentement que l'autre à travers le cristal et se trouvant par

conséquent en retard par rapport à l'autre. Nous réaliserons donc ici ces conditions de l'interférence lorsque les ondes seront ramenées dans un même plan.

Si je place la plaque de spath entre les Nicols croisés et que j'emploie le faisceau conique, j'aurai sur l'écran le beau système d'anneaux colorés entourant l'extrémité de l'axe optique (*fig.* 48), dans lequel les bandes circulaires sont

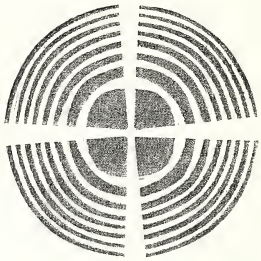
Fig. 48.



coupées par une croix noire. Les bras de cette croix sont parallèles aux directions des deux vibrations dans le polariseur et l'analyseur. Il est facile de voir que les deux rayons dont les plans de vibration au sein du spath coïncident avec les plans de vibration de l'un ou de l'autre prisme ne peuvent pas être transmis à travers les *deux*. Cette interception complète produit les bras de la croix. Avec de la lumière monochromatique, les anneaux sont simplement brillants ou noirs, les anneaux brillants se produisant là où l'épaisseur du spath fait que les rayons conspirent; les rayons noirs là où l'épaisseur fait que les rayons s'éteignent l'un l'autre. En faisant tourner l'analyseur de 90 degrés, nous obtenons les phénomènes complémentaires. La croix

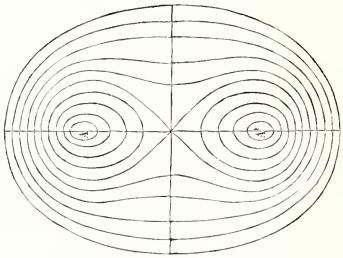
noire fait place à une croix brillante, et chaque rayon obscur est remplacé par un anneau brillant. Ici, comme partout ailleurs, les différentes longueurs d'ondes donnent naissance à des anneaux colorés lorsque l'on emploie de la lumière blanche.

Fig. 49.



En outre de ces cristaux réguliers qui ne produisent la double réfraction dans aucune direction, et les cristaux

Fig. 50.



*uniaxes* qui la produisent dans toutes les directions, à l'exception d'une seule, Brewster a découvert que, dans une grande classe de cristaux, il y a deux directions dans lesquelles la double réfraction n'a pas lieu. On les a appelés *biaxes*. Lorsque des plaques, convenablement taillées, de ces cristaux sont placées entre le polariseur et l'analyseur, ces axes A, A′ (*fig.* 50) se montrent entourés, non plus de

cercles, mais de courbes d'un autre ordre et d'un caractère mathématique parfaitement défini. Chaque bande, comme Herschel l'a prouvé expérimentalement, forme une lemniscate; mais la preuve expérimentale, ici comme dans d'autres cas sans nombre, avait été précédée par la démonstration *a priori* que, conformément à la théorie ondulatoire, les bandes devaient posséder ce caractère spécial.

J'ai insisté, trop longuement peut-être, sur la polarisation elle-même et sur les phénomènes manifestés par les cristaux dans la lumière polarisée, dans le but de vous donner quelque idée de la solidité de la théorie qui embrasse tous ces phénomènes. Partant de la simple hypothèse des vibrations transversales, nous avons tout d'abord déterminé les longueurs d'ondes, et trouvé que tous les phénomènes de couleur dépendaient de cet élément. Les longueurs d'ondes peuvent être déterminées de diverses manières indépendantes. Newton les détermina virtuellement lorsqu'il mesura les périodes des accès. De fait, la longueur d'onde de l'accès est le quart d'une ondulation. Les longueurs d'ondes peuvent être déterminées par la diffraction sur les bords des fentes (voir l'*Appendice*); elles peuvent être déduites des franges d'interférence produites par la réflexion, des franges produites par la réfraction, et aussi des réseaux ou raies parallèles tracées sur verre avec la pointe du diamant, à des distances égales, et lorsque les longueurs d'ondes déterminées par ces méthodes indépendantes sont comparées ensemble, on trouve qu'il existe entre elles le plus parfait accord.

Avec les longueurs d'ondes à notre disposition, nous suivons l'éther dans les cas les plus compliqués de l'action

et de la réaction entre lui et la matière ordinaire : la théorie s'applique également à tous. « Elle n'exige aucune nouvelle hypothèse physique; mais de sa provision première de principes elle déduit la contre-partie fidèle de tout ce que montre l'observation ; elle rend compte des cas les plus embrouillés, elle les explique, elle les simplifie; elle prédit et révèle les plus inconnus; elle devient le guide de l'observation qui fut d'abord son maître et, illuminée par des conceptions mécaniques, elle devient douée de la vision intuitive ; elle acquiert une vue perçante qui, à travers les formes et les couleurs, atteint les forces et les causes ([1]). »

Mais, en même temps que je m'efforce de mettre en évidence sous vos yeux la puissance de la théorie ondulatoire comme solution de toutes les difficultés de l'Optique, ai-je la prétention de vous voir fermer les yeux à tous les arguments qui pourraient s'élever contre elle? En aucune manière. Vous m'objecteriez, et vous m'objecteriez justement, qu'il y a cent ans une autre théorie était soutenue par les hommes les plus éminents, et que, de même que la théorie alors en vogue a dû céder, la théorie ondulatoire pourra céder aussi à son tour. Cela semble raisonnable; mais permettez-moi d'apprécier la valeur précise de cet argument. Dans un langage semblable, une personne du temps de Newton, ou même de notre temps, peut raisonner ainsi : Hipparque, Ptolémée et nombre de grands hommes après eux croyaient que la Terre était le centre du système solaire; mais cette théorie, si profondément ancrée, a dû céder le terrain, et la théorie de la gravitation peut avoir à s'effacer à son tour. C'est aussi juste et

---

([1]) Whewell.

aussi raisonnable que le premier argument. En quoi consiste la force de la théorie de la gravitation ? Seulement dans sa compétence à expliquer tous les phénomènes du système solaire. En quoi consiste la force de la théorie des ondulations ? Seulement dans sa compétence à démêler et à expliquer des phénomènes cent fois plus compliqués que ceux du système solaire. Acceptez, si vous le voulez, le scepticisme de M. Mill [1] relativement à la théorie ondulatoire; mais, si votre scepticisme est logique, il devra embrasser la théorie de la gravitation dans un même doute, ou même dans un doute plus grand.

Il m'en coûterait trop d'abandonner ces phénomènes sans dire quelques mots d'une source de couleur qui, dans ces derniers jours, s'est souvent présentée à moi dans le bleu de votre ciel à midi, et dans le cramoisi foncé de votre horizon au coucher du Soleil. Je vais résumer ici et étendre ce que j'ai déjà écrit ailleurs sur ce sujet. On peut démontrer, par les preuves les plus concluantes, que la lumière du firmament est une lumière réfléchie. La lumière du firmament vient à nous transversalement à la direction des rayons solaires, et même quelquefois contre la direction des rayons solaires; et cet afflux latéral ou opposé du mouvement ondulatoire ne peut être dû qu'au rebondissement des ondes sur l'air lui-même, ou sur quelque chose en suspension dans l'air. En outre, la lumière solaire n'est pas réfléchie par le firmament dans les proportions qui produisent

---

(1) Mort depuis que ces lignes ont été écrites.

(2) Le seul essai que je connaisse sur la théorie ondulatoire sort de la plume d'un écrivain américain : c'est l'excellent Rapport de M. le président Barnard pour 1862, publié par l'Institut Smithsonien.

le blanc. Le ciel est bleu, ce qui indique un excès des ondes les plus courtes. On a cherché dans le bleu de l'air la raison du bleu du firmament; mais alors a surgi cette question : si l'air est bleu, comment la lumière du Soleil levant ou couchant qui traverse de grandes distances d'air peut-elle être jaune, orangée ou même rouge? Le passage de la lumière solaire blanche à travers un milieu bleu ne peut en aucune manière rougir la lumière. L'hypothèse d'un air bleu n'est donc pas soutenable. De fait, l'agent, quel qu'il soit, qui nous envoie la lumière du firmament, exerce en nous l'envoyant une action dichroïque. La lumière réfléchie est bleue, la lumière transmise est orangée ou rouge. On voit se dessiner ainsi une distinction marquée entre la réflexion par le firmament et la réflexion par un nuage ordinaire, puisque ce dernier n'exerce pas d'action dichroïque.

Le nuage, de fait, ne tient pas compte des dimensions des ondes de l'éther et les réfléchit toutes de la même manière. La cause de ce fait peut être que les particules du nuage sont si grosses, en comparaison de la petitesse des dimensions des ondes lumineuses, qu'elles les dispersent toutes indifféremment. Un large rocher réfléchit les vagues de l'Atlantique aussi facilement que la ride soulevée par l'aile d'un oiseau de mer, et en présence de larges surfaces les différences de grandeur qui existent entre les ondes de l'éther peuvent aussi disparaître; mais en supposant que les particules réfléchissantes, au lieu d'être vraiment grandes, soient vraiment petites, en comparaison des dimensions des ondes, alors, au lieu que l'onde entière soit reçue de front et renvoyée en grande partie en arrière, une petite portion seulement de l'onde est dispersée par l'obstacle. Supposons donc que de très-petites particules étrangères soient diffu-

sées dans notre atmosphère. Des ondes de toute grandeur viennent les frapper, et à chaque collision une portion de l'onde incidente est écartée. Toutes les ondes du spectre, depuis le rouge extrême jusqu'au violet extrême, sont ainsi traitées ; mais dans quelles proportions seront-elles respectivement dispersées? La largeur est une dimension relative, et plus l'onde est petite, plus grande relativement est la dimension de chacune des particules qu'elle va frapper, plus grande aussi est relativement la portion réfléchie.

Un petit caillou placé sur le chemin des rides circulaires produites à la surface d'un étang tranquille par la chute d'une lourde goutte d'eau renverra en arrière une grande fraction de chacune des rides qui la rencontrent ; tandis que la fraction d'une grande vague renvoyée par le petit caillou peut n'être qu'infiniment petite. Cela posé, pour que la lumière solaire reste blanche, les proportions de ses constituants ne doivent pas être altérées. Or, dans la dispersion de la lumière par des particules très-petites, nous voyons que ces proportions sont altérées. Les ondes courtes sont en excès, et par conséquent, dans la lumière dispersée, le bleu sera la couleur prédominante. Les autres couleurs du spectre doivent, jusqu'à un certain point, être associées avec le bleu; elles ne sont pas absentes, mais seulement déficientes ou en défaut; nous devons, de fait, les avoir toutes, mais en proportions qui vont diminuant du violet au rouge.

Nous avons ainsi préparé les voies à cette conclusion raisonnée que, s'il se rencontre dans l'atmosphère des particules petites comparativement aux dimensions des ondes de l'éther, la lumière dispersée par ces particules sera exactement celle que nous observons dans notre ciel azuré. Et de fait, si nous analysons cette lumière, nous y trouvons toutes

les couleurs du ciel dans les proportions indiquées par notre conclusion.

Par ses collisions successives avec ces particules, la lumière blanche est de plus en plus dépouillée de ses ondes les plus courtes; elle perd, par conséquent, de plus en plus de sa proportion de bleu. On peut prévoir ce qui en résultera. La lumière transmise, lorsqu'elle aura traversé de courtes distances, nous paraîtra jaunâtre; mais comme, à mesure que le Soleil descend vers l'horizon, la distance atmosphérique augmente, et par conséquent aussi le nombre des particules dispersantes, elles affaiblissent successivement le violet, l'indigo, le bleu, et altèrent même les proportions du vert. La lumière transmise dans de semblables circonstances doit passer du jaune au rouge par l'orangé. C'est aussi ce que nous trouvons dans la nature. Ainsi, tandis que la lumière réfléchie nous donne à midi l'azur foncé du ciel alpin, la lumière transmise nous donne au coucher du Soleil le cramoisi si chaud des neiges alpines.

Mais peut-on prouver que de petites particules agissent réellement de la manière indiquée? On ne saurait en douter. Chacun de nous peut mettre cette question à l'épreuve de l'expérience. L'eau ne dissout pas la résine, mais l'esprit-de-vin la dissout. Lorsqu'on verse dans l'eau une goutte d'esprit-de-vin tenant en dissolution de la résine, cette résine se sépare immédiatement sous forme de particules solides qui rendent l'eau laiteuse. M. le professeur Brüke nous a indiqué les proportions qui produisent les particules qui conviennent plus particulièrement au but que nous voulons atteindre. On dissout 1 gramme de mastic pur dans 87 grammes d'alcool absolu, et l'on fait tomber goutte à goutte la solution transparente dans un verre contenant de l'eau claire vivement agitée. Il se forme ainsi un

précipité excessivement fin qui manifeste sa présence par son action sur la lumière. Si je place une surface noire derrière le verre, et si je laisse arriver la lumière d'en haut ou de face, le milieu prend l'aspect pur d'un beau ciel bleu. Une trace de savon dans l'eau lui donne une teinte bleue. Le lait de Londres et, je le crains, le lait aussi de Liverpool, se rapprochent de la même couleur par une opération de même nature, et Helmholtz a irrévérencieusement découvert le fait qu'un œil bleu est simplement un milieu trouble.

Mais il est en notre pouvoir de réaliser de plus près encore les conditions matérielles de ce problème. Nous pouvons engendrer des firmaments artificiels et prouver leur parfaite identité avec les firmaments naturels, relativement à nombre de phénomènes complétement inattendus.

On a récemment montré que dans un grand nombre de circonstances les ondes éthérées issues d'une source intense, telle que le Soleil ou la lumière électrique, sont aptes à dissocier les atomes des molécules gazeuses. L'appareil employé pour mettre ce fait en évidence est formé d'un tube de verre de 1 mètre de longueur, de 6 à 8 centimètres de diamètre intérieur. Le gaz ou la vapeur à examiner est introduite dans le tube, et l'on fait agir sur elle le faisceau condensé de la lampe électrique. La vapeur est choisie de telle sorte que l'*un* au moins des produits de la décomposition, au moment où il est formé, soit précipité sous forme de nuage. En graduant la quantité de la vapeur, ce précipité peut être amené à tous les degrés de finesse, depuis des particules visibles à l'œil nu jusqu'à des particules qui sont probablement bien au delà de la portée de nos pouvoirs microscopiques. Je n'ai aucune raison de douter qu'on puisse obtenir ainsi des particules dont les diamètres ne seraient

qu'une très-petite fraction de la longueur d'onde de la lumière violette.

Or, dans tous les cas, lorsqu'on observe des vapeurs convenables dans un état d'atténuation suffisant, quelles que puissent d'ailleurs être ces matières, l'action visible commence par la formation d'un *nuage bleu*. Je tiens à me mettre en garde au début contre tout malentendu dans l'emploi de ce terme. Le nuage bleu auquel je fais allusion est complétement invisible dans la lumière diffuse ordinaire. Pour être vu, il faut qu'il soit entouré d'obscurité; il est éclairé *uniquement* par un puissant faisceau de lumière. Ce nuage diffère par plusieurs particularités importantes des plus fins nuages ordinaires, et l'on peut lui assigner justement une position intermédiaire entre ces nuages et les vrais nuages de vapeur.

On peut faire que les particules de ce nuage actinique croissent de dimensions infiniment petites et complétement ultra-microscopiques à des dimensions sensibles, et, par leur moyen, à un certain stage de leur croissance, nous produisons un bleu qui rivalise, s'il ne le surpasse pas, avec le bleu le plus foncé du ciel de l'Italie. J'introduis dans notre tube un mélange d'air et de vapeur de nitrite de butyle, en quantité suffisante pour abaisser la colonne de mercure de la machine pneumatique d'un peu plus de 1 millimètre; puis j'ajoute un mélange d'air et d'acide chlorhydrique en quantité suffisante pour abaisser de nouveau cette même colonne de 13 millimètres. A travers ce composé, formant une atmosphère très-raréfiée, je fais passer un faisceau de lumière électrique. Je vois apparaitre graduellement dans le tube un nuage azuré splendide, qui se fonce pendant un certain temps, atteint un maximum d'intensité et de pureté, puis, à mesure que les particules grossissent,

passe au bleu blanchâtre. L'expérience est très-instructive, et elle met en évidence un principe général. On pourrait utiliser pour cette expérience plusieurs autres substances incolores douées de propriétés optiques et chimiques très-diverses. Dans tous les cas, le *nuage incipient* est d'un bleu superbe, donnant ainsi la démonstration du fait que les particules de dimensions infiniment petites, sans aucune couleur propre, et indépendamment des propriétés optiques que la substance peut manifester à l'état de masse, sont aptes à produire la couleur bleu de ciel.

Mais il est un autre sujet qui, se rattachant à notre firmament, présente un caractère plus subtil encore et plus caché que sa couleur : je veux parler de ce mystérieux et beau phénomène de la polarisation de la lumière bleue du firmament. Si l'on regarde le ciel bleu sur plusieurs points à travers un prisme de Nicol, que l'on fait tourner autour de son axe, on constate tout aussitôt des variations d'éclat. Dans certaines positions du prisme, et sur certains points du firmament, la lumière semble complétement transmise, tandis qu'il suffit de faire tourner le prisme autour de son axe d'un angle de 90 degrés pour diminuer sensiblement l'intensité de la lumière. Des expériences de ce genre prouvent que la lumière bleue envoyée à l'œil par le firmament est polarisée, et, par un examen plus attentif, on trouve aussi que la direction de polarisation plus parfaite est perpendiculaire aux rayons solaires. Si l'azur des cieux était semblable à la lumière ordinaire du Soleil, la rotation du prisme n'aurait sur elle aucun effet; elle serait transmise également pendant la rotation entière du prisme. La lumière du firmament est en grande partie éteinte, parce qu'elle est en grande partie polarisée.

Le même phénomène est parfaitement reproduit par

nos nuages actiniques, la seule condition nécessaire à sa production étant la petitesse des particules. Dans tous les cas et avec toutes les substances, le nuage formé au début, lorsque les particules précipitées sont suffisamment fines, est *bleu*. Dans tous les cas, en outre, le fin nuage bleu polarise *parfaitement* le faisceau qui l'illumine, la direction du plan de polarisation faisant un angle de 90 degrés avec l'axe du faisceau illuminateur.

Il est extrêmement intéressant d'observer cette polarisation, tant lorsqu'elle est parfaite que lorsqu'elle est sur son déclin; car, dix ou quinze minutes après sa première apparition, la lumière du nuage incipient fortement illuminé, regardée horizontalement, est complétement éteinte par le prisme de Nicol avec sa grande diagonale verticale. Mais, à mesure que le bleu ciel devient graduellement impur par l'introduction de particules de grandes dimensions, en d'autres termes, lorsqu'un nuage réel commence à se former, la polarisation commence à se détériorer, parce qu'une partie de la lumière traverse le prisme dans toutes ses positions, comme elle le fait dans le cas de la lumière diffuse. Il est digne de remarque que, quelque temps après la cessation de la polarisation parfaite, le résidu de lumière, qui passe lorsque le Nicol est dans la position du minimum de transmission, est un bleu magnifique, parce que la lumière blanche du nuage est éteinte. Lorsque la contexture du nuage est devenue assez grossière pour approcher de celle des nuages ordinaires, la rotation du Nicol cesse d'avoir un effet sensible sur la quantité de lumière reçue à angle droit avec le faisceau.

La perfection de la polarisation, dans une direction perpendiculaire au faisceau éclairant, est aussi mise en évidence par l'expérience suivante, faite avec une vapeur con-

venable. Un prisme de Nicol assez large pour embrasser le faisceau entier de la lampe électrique est placé entre la lampe et le tube à expériences. Envoyant le faisceau par le prisme de Nicol à travers le tube, je me place en face de lui, mon œil étant au niveau de son axe; mon préparateur occupe une place semblable derrière le tube. La courte diagonale du grand Nicol étant d'abord verticale, le plan de vibration est lui-même vertical. A mesure que la lumière continue à agir, nous voyons se former lentement, mon aide et moi, un superbe nuage bleu; mais ce nuage, si foncé et si riche lorsqu'on le regarde des positions indiquées, *disparaît entièrement lorsqu'on le regarde verticalement d'en haut ou d'en bas*. La réflexion par le nuage n'est pas possible dans ces directions. Lorsque le grand Nicol tourne lentement autour de son axe, l'œil de l'observateur étant au niveau du rayon et la ligne de vision lui étant perpendiculaire, la lumière émise horizontalement subit une extinction complète quand la longue diagonale du grand Nicol est verticale; mais alors un nuage de lumière bleue apparaît lorsqu'on regarde d'en bas ou d'en haut. Cette expérience vraiment délicate, que j'aurais certainement faite sans qu'elle m'eût été suggérée, m'a été, de fait, inspirée définitivement par une remarque d'une lettre de M. le professeur Stokes.

Tous les phénomènes de couleur et de polarisation observables dans le cas de la lumière du firmament sont donc mis en évidence par ceux des nuages actiniques; ces nuages, en outre, présentent des phénomènes additionnels, qu'il ne nous conviendrait pas de poursuivre, qu'il ne nous serait même pas possible de découvrir dans le firmament réel. Ils nous permettent, par exemple, de suivre la polarisation depuis sa première apparition au sein du bleu

visible jusqu'à son extinction finale au sein du nuage grossier. Ces changements, autant qu'il est nécessaire actuellement de nous en occuper, peuvent être résumés comme il suit :

1° Le nuage actinique, aussi longtemps qu'il continue à être bleu, envoie de la lumière polarisée dans toutes les directions; mais la direction du maximum de polarisation, comme pour la lumière du firmament, est à angle droit avec la direction du faisceau éclairant.

2° Aussi longtemps que ce nuage reste distinctement bleu, la lumière émise par lui à angle droit avec le faisceau éclairant est *parfaitement polarisée*. Elle peut être entièrement éteinte par le prisme de Nicol; le nuage dont elle émane disparaît alors tout à fait. Tout écart de la perpendiculaire rend une portion de la lumière apte à traverser le prisme.

3° La direction de vibration de la lumière polarisée est à angle droit avec le faisceau éclairant. Par là même, une plaque de tourmaline, avec son axe perpendiculaire au faisceau, arrête la lumière; elle la transmet quand son axe est parallèle au faisceau.

4° Une plaque de sélénite placée entre le Nicol et le nuage actinique montre les couleurs de la lumière polarisée. De fait, le nuage joue lui-même le rôle d'un Nicol polarisant.

5° Les particules du nuage bleu sont incommensurablement petites; mais elles grossissent, augmentent graduellement de dimensions, et, à une certaine période de leur croissance, elles cessent d'émettre de la lumière parfaitement polarisée. Pendant quelque temps encore après, la lumière qui atteint l'œil et traverse le prisme de Nicol est d'un bleu magnifique, qui surpasse de beaucoup en inten-

sité et en pureté celui du ciel le plus pur. Ainsi les ondes qui *sentent les premières l'influence de la dimension* aux deux limites de la polarisation sont les ondes les plus courtes du spectre. Elles sont les premières à accepter la polarisation, et elles sont les dernières qui lui échappent.

# CINQUIÈME LEÇON.

L'échelle de la vision est incommensurable avec l'échelle de la radiation. — Fluorescence. — Rayons invisibles rendus visibles. — La vision n'est pas le seul sens auquel les faisceaux solaire et électrique font appel. — Chaleur du faisceau lumineux. — Combustion par le faisceau total au foyer des miroirs et des lentilles. — Combustion à travers les lentilles. — Ignition du diamant. — Recherche des rayons qui sont efficaces dans cette ignition. — Découverte, par William Herschel, des rayons solaires obscurs. — Rayons invisibles base des rayons visibles. — Les rayons invisibles séparés par un filtre-rayon des rayons visibles. — Combustion au sein des foyers obscurs. — Conversion des rayons de chaleur en rayons de lumière. — Calorescence. — Rôle joué dans la nature par les rayons obscurs. — Identité de la lumière et de la chaleur rayonnante. — Images invisibles. — Réflexion, réfraction, polarisation rectiligne, dépolarisation, polarisation circulaire, double réfraction et magnétisation de la chaleur rayonnante.

La première question que nous avons à considérer ce soir est celle-ci : l'œil, en tant qu'organe de la vision, est-il en rapport avec l'échelle entière de la radiation? Est-il apte à recevoir des impressions visuelles de tous les rayons émis par le Soleil? La réponse est négative. Si nous acceptons pour un moment cette notion de progrès continu, d'amélioration et d'ascension, comprise sous le mot d'*évolution,* nous pourrons conclure sans crainte qu'il existe une provision d'impulsions visuelles de nature à tenir l'homme en éveil, beaucoup plus grande que celles actuellement en notre possession. Par exemple, Ritter découvrit, en 1801, qu'au delà du violet extrême du spectre il existe une large

effluve de rayons complétement sans utilité, en ce qui concerne nos moyens actuels de vision. Ces ondes ultra-violettes, cependant, quoique impuissantes à exciter le nerf optique, peuvent tellement agiter les molécules de certaines substances composées sur lesquelles elles tombent, qu'elles effectuent sa décomposition.

Mais, quoique les rayons bleus, violets et ultra-violets puissent agir ainsi sur certaines substances, ce fait suffirait difficilement pour nous autoriser à leur donner le nom de *rayons chimiques,* qui les distingue des autres constituants du spectre. Pour ce qui regarde leur action sur les sels d'argent et plusieurs autres substances, telles par exemple que celles qui entrent dans la production des nuages actiniques, dont il a été question dans la dernière Leçon, ils méritent peut-être cette dénomination ; mais, dans le cas de l'exemple le plus frappant de l'action chimique de la lumière, à savoir la décomposition de l'acide carbonique au sein des feuilles des plantes, à laquelle mon éminent ami, M. le docteur Draper, a indissolublement attaché son nom, les rayons jaunes se sont trouvés les plus actifs.

Il est des substances, cependant, sur lesquelles les ondes violettes et ultra-violettes exercent une puissance spéciale de décomposition, et, en laissant le spectre invisible tomber sur des surfaces préparées avec ces substances, nous révélons à la fois et l'existence et l'étendue du spectre ultra-violet.

Cette méthode de mettre en évidence les rayons ultra-violets par leur action chimique est depuis longtemps connue ; en effet, Thomas Young photographiait les anneaux ultra-violets de Newton. Nous avons maintenant à démontrer leur présence d'une autre manière. En règle générale, les corps transmettent la lumière ou l'absorbent ;

il est cependant un troisième cas, celui dans lequel la lumière tombant sur le corps n'est ni transmise, ni transformée, mais convertie en lumière d'une autre sorte. M. le professeur Stokes, l'un des successeurs de Newton dans l'Université de Cambridge, a démontré ce changement d'une sorte de lumière en une autre, et poussé ses expériences assez loin pour rendre visibles les rayons invisibles.

Il a été démontré qu'un grand nombre de substances examinées par M. Stokes émettent de la lumière lorsqu'elles sont excitées par les ondes ultra-violettes. Vous connaissez la vitesse de vibration correspondant au violet extrême du spectre; vous savez que, pour percevoir la sensation de cette couleur, la rétine doit être frappée 789 millions de fois en une seconde. A cette limite, la rétine cesse d'être utile comme organe de la vision; car, quoique elle soit frappée par la récurrence de vibrations plus rapides, ces vibrations sont impuissantes à éveiller la sensation de la lumière. Mais, lorsqu'on fait tomber ces ondes non visibles sur les molécules de certaines substances, sur celles du sulfate de quinine par exemple, elles forcent ces molécules ou leurs atomes constituants à vibrer, avec cette particularité que les vibrations ainsi excitées sont d'une période plus lente que celle des ondes excitantes; or cette diminution de la vitesse de vibration, causée par l'intermédiaire du sulfate de quinine, ramène les rayons invisibles dans les limites de la vision. Notre bisulfure de carbone, par exemple, qui, amené à former un prisme, est si éminemment approprié aux expériences faites avec les rayons visibles, ne convient nullement pour les expériences sur les rayons ultra-violets. Le flint-glass est meilleur, et le cristal de roche meilleur encore. Toutefois un prisme de verre nous suffira pour atteindre notre but actuel. Si nous envoyons, au moyen

de prisme, un spectre non sur la surface blanche de notre écran, mais sur une feuille de papier imbibée d'une solution saturée de sulfate de quinine, puis séchée, nous obtenons une extension notable du spectre visible. Nous voyons tout d'abord une portion du violet devenue plus blanche et plus brillante; mais, en outre, nous voyons luire la couleur là où, dans le cas du papier non préparé, on ne voyait absolument rien. D'autres substances produisent un effet semblable; une substance, entre autres, récemment découverte par M. le Président Morton de Steven's Institut, et à laquelle il a donné le nom de *thallène,* produit un allongement vraiment frappant du spectre, en même temps que la nouvelle lumière engendrée brille d'un éclat particulier.

Le spath-fluor et quelques autres substances chauffées à une température au-dessus du rouge émettent de la lumière. Depuis l'époque de leur formation ou cristallisation, cette faculté d'imprimer à l'éther des vibrations visibles semble avoir été communiquée à cette substance. La lumière est restée à l'état potentiel ou en puissance pendant tout ce temps et, comme l'a si bien expliqué Draper, la chaleur, quoiqu'elle ne possède pas elle-même d'intensité visuelle, peut libérer assez les molécules pour les rendre aptes à exercer le pouvoir latent de vibration qu'elles possèdent. La manière dont le spath-fluor se comporte détermina M. Stokes dans le choix du nom qu'il donna à sa grande découverte; il appela *fluorescence* l'acte qui rend visibles les rayons ultra-violets.

Par le moyen d'un verre de couleur violet foncé, nous arrêtons la totalité de la lumière de notre faisceau de lumière électrique; mais ce verre reste transparent d'une manière toute particulière aux rayons violets et ultra-violets. Le faisceau de rayons violets tombe maintenant sur

une grande jarre remplie d'eau. Je verse dans cette eau une solution de sulfate de quinine : vous voyez tous naître aussitôt des nuages opaques qui se précipitent instantanément. Des morceaux d'écorce de marronnier, jetés à la surface de l'eau, laissent tomber aussi de très-beaux filets ou stries nuageuses, mais ce ne sont pas des nuages ; il n'y a là rien de précipité : l'action observée est une action de molécules et non de particules. Le milieu que vous avez sous les yeux n'est pas un milieu trouble ; en effet, lorsque vous regardez à travers sa surface lumineuse, il est parfaitement clair.

Si nous dessinons sur une feuille de papier une fleur ou un bouquet avec le sulfate de quinine et que nous le mettions en plein faisceau de lumière blanche, c'est à peine si nous voyons quelque chose ; mais, dès que nous interposons le verre violet, le dessin brille instantanément, faisant fortement contraste avec le violet sombre qui l'entoure. Voici un magnifique échantillon d'un dessin semblable préparé pour moi par M. le Président Morton avec son thallène. Éclairé par la lumière violette, il montre une fluorescence particulière très-brillante. Les expériences de M. Bence Jones semblent prouver qu'il y a dans le corps humain quelque substance ressemblant au sulfate de quinine et qui rend tous les tissus du corps plus ou moins fluorescents. Le cristallin de l'œil produit cet effet d'une manière très-frappante. Lorsque, par exemple, je plonge mon œil dans le faisceau violet, j'ai la conscience d'une lueur bleu blanchâtre qui remplit tout l'espace devant moi, et cette lueur est causée par la lumière fluorescente engendrée au sein de mon œil lui-même. Regardé du dehors, le cristallin brille en même temps d'une lumière vive.

Longtemps avant que son origine physique fût comprise, cette lumière fluorescente attirait déjà l'attention. Boyle,

comme sir Charles Wheatstone a eu la bonté de me l'apprendre, la décrit d'une manière très-complète et très-exacte : « Nous avons trouvé quelquefois, dit-il, dans les boutiques de nos droguistes, un certain bois appelé *lignum nephriticum,* parce que les habitants de la contrée où il croît ont coutume de l'employer en infusion dans l'eau pure contre les calculs des reins. Ce bois nous a donné l'occasion de faire une expérience, laquelle, en outre de sa singularité, ne vient pas peu en aide à un observateur habile pour le mettre sur la trace de l'origine des couleurs. Prenez ce bois néphrétique, et avec un canif coupez-le en petites cosses ; jetez à peu près une poignée de ces cosses dans 1, 1 $\frac{1}{2}$ ou 2 litres d'eau de la source la plus pure. Décantez cette eau imprégnée dans une fiole de verre, puis, si vous tenez la fiole directement entre la lumière et votre œil, vous la verrez entièrement teinte d'une vive couleur presque dorée. Mais si vous la tenez loin de la lumière, de telle sorte que votre œil soit placé entre la croisée et la fiole, le liquide vous apparaîtra teint d'une couleur bleu foncé très-agréable.

» Ce phénomène, continue Boyle, et beaucoup d'autres que j'ai observés dans cette délicieuse expérience ont été vus par quelques-uns de mes amis, non sans quelque admiration, et je me rappelle qu'un excellent oculiste trouvant, par accident, une fiole pleine de cette liqueur dans la chambre d'un ami, sans jamais avoir entendu parler de l'expérience et sans avoir près de lui quelqu'un qui pût lui dire ce que pouvait être cette étrange liqueur, fut saisi, comme il me l'apprit plus tard, d'une grande appréhension qu'un nouveau trouble inconnu eût envahi son œil. J'avoue qu'un phénomène si inusité me rendit très-inquiet de découvrir la raison de cette expérience ; et quoique je sois

bien loin de prétendre l'avoir trouvée, cependant mes recherches, je le suppose, m'ont mis en état de vous préparer les voies, de telle sorte que votre sagacité plus grande puisse vous conduire à la découverte de la cause de cette merveille (1). »

Gœthe, dans son *Farbenlehre* (*Traité des couleurs*), décrit ainsi la fluorescence de l'écorce de châtaignier. « Prenez une bande d'écorce de châtaignier fraîche, et plongez-la dans un verre d'eau, vous verrez immédiatement se produire le bleu ciel le plus parfait (2). » Sir John Herschel signala et découvrit le premier la fluorescence du sulfate de quinine; il montra que sa lumière provenait d'une couche mince de la solution adjacente à la surface, là où la lumière entre dans le liquide. Il montra, en outre, que le faisceau incident, quoique n'ayant pas perdu sensiblement de son intensité lumineuse, perd le pouvoir de produire la lumière fluorescente bleue quand on le fait passer de nouveau à travers une solution de sulfate de quinine. Sir David Brewster aussi étudia cette question; mais il était réservé à M. Stokes, non-seulement de l'étendre et de la développer, mais d'en donner son explication complète et définitive.

Les ondes de nos pointes de charbon incandescent font appel à un autre sens que celui de la vision : elles ne produisent pas seulement la sensation de la lumière, elles produisent aussi la sensation de la chaleur. L'image agrandie des pointes de charbon est actuellement projetée sur l'écran, et avec un instrument convenable nous pourrons mettre en

---

(1) *Œuvres de Boyle*, édition de Birch, t. I, p. 729 et 730.

(2) *Œuvres de Gœthe*, t. XXIX, p. 24.

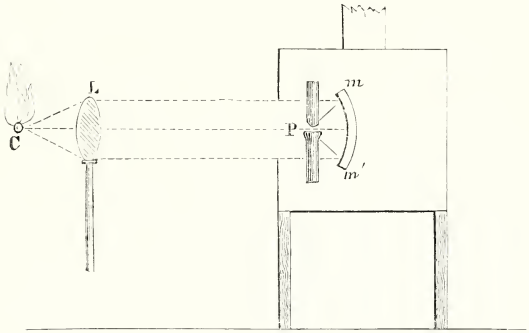
évidence le pouvoir échauffant des rayons qui forment cette image. Dans ce cas, cependant, la chaleur est répandue sur une trop grande surface pour être intense. En tirant en avant la lentille, et en rapprochant un écran mobile de la lanterne, nous voyons l'image devenir de plus en plus petite; les rayons, en même temps, deviennent plus concentrés jusqu'à ce qu'enfin ils soient capables de percer en brûlant un anneau circulaire dans le papier noir sur lequel ils tombent. Rendant le faisceau parallèle et le faisant tomber sur un miroir concave, nous le réduisons à un foyer très-petit, et du papier placé à ce foyer prend feu, fume et brûle. Ce résultat peut être obtenu avec notre chambre et notre lentille ordinaires, avec adjonction d'un miroir concave de puissance modérée.

Nous allons maintenant recourir à des moyens plus efficaces, en nous servant de la radiation de la lumière électrique. Dans cette lanterne plus grande, doublée de tôle noircie, j'installe une lampe, dans des conditions tout à fait semblables à celles employées jusqu'ici; mais, au lieu de concentrer les rayons des pointes de charbon avec une lentille convergente, nous les concentrons avec un miroir concave *mm'* (*fig.* 51), argenté à sa surface intérieure, et placé derrière les charbons P. Avec ce miroir, nous pouvons amener les rayons à sortir par l'ouverture antérieure de la chambre, parallèles ou convergents. Ils sont actuellement parallèles, et par conséquent diffusés jusqu'à un certain point. Nous plaçons une lentille L sur le trajet du faisceau; la lumière rendue convergente forme le foyer C, et à ce foyer le papier n'est pas seulement percé, avec formation d'un anneau enflammé, il est instantanément consumé.

Plusieurs métaux peuvent être fondus ou brûlés de la même manière. J'ai parlé, dans ma première Leçon, de la

combustibilité du zinc. En plaçant à ce foyer une bande découpée dans une feuille de zinc, on la voit instantanément prendre feu et brûler avec sa flamme pourpre caractéristique. Je veux maintenant substituer à notre lentille de verre une autre lentille d'un caractère plus nouveau. Dans un moule en fer doux, on a fait naître cette lentille de glace translucide, je la place dans la position occupée il n'y a qu'un moment par la lentille de verre, et voici que le fais-

Fig. 51.




ceau est amené à former un foyer de très-petite dimension. A ce foyer, je place un morceau de papier noir, dans un pli duquel j'ai caché un peu de coton-poudre. Le papier prend feu immédiatement, et le coton-poudre fait explosion. N'est-il pas étrange que le faisceau possède un si grand pouvoir calorifique, après avoir traversé une substance si froide? Dans ses expéditions arctiques, le Dr Scoresby a réussi à faire faire explosion à de la poudre à canon par les rayons du soleil rendus convergents au foyer d'une grande lentille de glace : ici, l'effet est produit par une petite lentille et avec une source terrestre de chaleur.

Dans cette expérience, vous observez qu'avant que le faisceau atteigne la lentille de glace il a traversé une auge

de verre contenant de l'eau. Le rayon est ainsi dépouillé de ceux de ses constituants qui, si je leur permettais de tomber sur la lentille, altéreraient sa surface et gâteraient le foyer. Et ceci m'amène à vous dire, par anticipation, un mot relatif à la transparence. Dans notre première Leçon, nous avons abordé carrément la production des couleurs par absorption, et nous avons parlé plusieurs fois de l'extinction des rayons de lumière. Cela signifiait-il que la lumière était complétement annulée, anéantie? Nullement. Elle avait simplement diminué assez de réfrangibilité pour échapper à la classe des rayons visuels. *Elle était convertie en chaleur*. Notre ruban rouge dans le vert du spectre éteignait le vert, mais, convenablement examiné, il nous aurait révélé que sa température s'était élevée. Notre ruban vert dans le rouge du spectre éteignait le rouge; mais en même temps sa température s'était accrue dans un degré exactement proportionnel à la lumière éteinte. Notre ruban noir, lorsque nous le faisions passer à travers le spectre, se montrait apte à éteindre toutes ses couleurs; mais, à chaque étape de sa course, il s'engendrait dans ce ruban une quantité de chaleur exactement équivalente à la quantité de lumière perdue. C'est seulement lorsque l'absorption de la lumière a lieu que de la chaleur est ainsi produite, et la chaleur est toujours le résultat de l'absorption.

Examinez donc cette eau placée en avant de la lampe après que le faisceau l'a traversée; elle est sensiblement chaude, et si nous l'y laissions assez longtemps elle arriverait à bouillir. Cela est dû à l'absorption par l'eau d'une portion du faisceau électrique; mais une certaine autre portion passe sans être absorbée, et ne doit en aucune manière contribuer à l'échauffement de l'eau. Cela posé, la glace est

aussi en grande partie transparente pour cette dernière portion, et, par conséquent, elle n'est que très-peu fondue par elle; c'est ainsi qu'en employant cette portion particulière du rayon nous laissons notre lentille intacte et apte à produire un foyer nettement défini [1].

Placé à ce foyer, le papier blanc n'est pas enflammé, parce qu'il ne peut pas absorber les rayons émergeant de la lentille de glace. A cette même place, au contraire, le papier noir prend feu instantanément, parce qu'il absorbe la lumière qui a traversé sans absorption la lentille de glace. A ces manifestations du pouvoir calorifique nous pourrions ajouter la combustion du diamant dans l'oxygène par le faisceau concentré de la lampe électrique.

Sur le chemin du faisceau issu de notre lampe, nous avons placé une auge à parois de verre contenant une solution d'alun. *Toute la lumière* du faisceau traverse cette solution; à sa sortie, elle est reçue par un puissant miroir convergent argenté à sa surface. Vous pouvez voir ce faisceau conique de lumière réfléchie traçant lui-même sa route sur la poussière de la chambre. Une bande de papier blanc placée au foyer brille d'un éclat éblouissant, et elle n'est pas seulement roussie; mais si nous enlevons l'auge d'alun, le papier s'enflamme instantanément : il faut donc qu'il y ait dans ce faisceau quelque chose de plus que sa lumière. La *lumière* n'est pas absorbée par le papier blanc,

---

[1] La comète de 1680, lorsqu'elle fut le plus près du Soleil, n'était distante de sa surface que d'un sixième du diamètre solaire. Newton estima qu'en ce point sa température devait être 2000 fois celle du fer fondu. Il importe de faire remarquer que la température de la comète ne peut pas se conclure de sa proximité du Soleil. Si son pouvoir d'absorption est suffisamment bas ou faible, la comète peut garder au voisinage du Soleil la température des espaces célestes.

et, par conséquent, elle ne doit pas enflammer ce papier; mais il y a là quelque chose en dehors et au-dessus de la lumière, qui est absorbé et qui produit la combustion. Qu'est cette autre chose?

Dans l'année 1800, sir William Herschel fit passer un thermomètre à travers les diverses couleurs du spectre solaire, et marqua l'élévation de température correspondant à chaque couleur. Il trouva que l'effet d'échauffement augmentait du violet au rouge; mais il ne s'arrêta pas au rouge, il poussa son thermomètre jusque dans l'espace sombre au delà du rouge; là il trouva que la température était de fait plus élevée que dans toutes les autres parties du spectre visible. Par cette importante observation, il prouva que le Soleil émet des rayons de chaleur obscure qui sont tout à fait impropres à exciter la vision. Ce sujet fut ensuite étudié par Seebeck, Melloni, Muller et autres, et en quelques années on a pu constater qu'il avait reçu une extension considérable et des applications importantes. On a inventé une méthode à l'aide de laquelle le faisceau de lumière solaire ou électrique peut être tellement filtré, tamisé, qu'on en détache et isole, pour la garder intacte, toute l'émission invisible ultra-rouge, tandis que les émissions visibles et les émissions ultra-violettes sont complétement interceptées. Nous pouvons ainsi opérer à volonté sur les ondes purement ultra-rouges.

Dans l'acte d'échauffement des corps solides portés à l'incandescence, cette émission invisible est nécessairement la base de l'émission visible. Je tends en avant de la table un fil de platine, et je le fais traverser par un courant électrique. Il est échauffé par le courant, et peut être senti chaud par la main; il émet ainsi des ondes de chaleur, mais non de lumière. En augmentant la force du courant, le

fil devient plus chaud, il finit par briller d'une faible lueur rouge. A ce point, M. le Dr Draper commença, il y a plusieurs années, des recherches intéressantes; il employa un courant voltaïque pour chauffer son platine, et il étudia à l'aide d'un prisme l'introduction successive des couleurs du spectre. Sa première couleur, comme ici, fut le rouge; vint ensuite l'orangé, puis le jaune, puis le vert, et enfin toutes les nuances du bleu. Ainsi, à mesure que la température du platine augmente graduellement, ses atomes sont amenés à vibrer plus rapidement : il se produit alors des ondes de plus en plus courtes, jusqu'à ce qu'on obtienne enfin des ondes correspondant au spectre entier. A mesure que chaque couleur est introduite, les couleurs qui l'ont précédée deviennent plus vives. Or la vivacité ou l'intensité de la lumière, comme celle du son, dépend, non de la longueur d'onde, mais de l'amplitude des vibrations; par conséquent, puisque les couleurs moins réfrangibles deviennent plus intenses à mesure que les couleurs plus réfrangibles sont introduites, nous sommes forcé de conclure que, côte à côte avec l'introduction des ondes plus courtes, nous avons une augmentation d'amplitude des ondes plus longues.

Ces remarques ne s'appliquent pas seulement à l'émission visible examinée par M. le Dr Draper, mais à l'émission visible qui précède l'apparition d'une lumière quelconque. Dans l'émission du fil de platine chauffé à blanc maintenant sous vos yeux, existent les vraies ondes dont nous sommes partis; leur intensité seulement est devenue un millier de fois plus grande par l'augmentation de température nécessaire à la production de la lumière blanche. Les deux effets sont liés entre eux : dans un solide incandescent ou dans un solide en fusion, vous ne pouvez pas

avoir les ondes plus courtes sans intensification des ondes plus longues. Un soleil n'est possible qu'à ces conditions : de là la découverte par sir William Herschel de l'émission invisible ultra-rouge.

La chaleur invisible émise à la fois par les corps obscurs et par les corps lumineux traverse l'espace avec la vitesse de la lumière et s'appelle *chaleur rayonnante*. A son tour la chaleur rayonnante peut devenir un explorateur convenable et puissant des conditions moléculaires, et, dans ces dernières années, elle a donné une signification nouvelle à l'acte de la combinaison chimique. Prenons pour exemple l'air que nous respirons : c'est un mélange d'oxygène et d'azote, et il se conduit relativement à la chaleur rayonnante comme le fait le vide, impuissant à l'absorber dans un degré sensible. Mais permettez à ces deux mêmes gaz de s'unir chimiquement : sans augmentation aucune dans la quantité de matière, sans altération aucune de la condition gazeuse, sans rien enlever en aucune manière à la transparence du gaz, l'acte de l'action chimique sera accompagné d'une énorme diminution de sa diathermancie ou de sa pénétrabilité à la chaleur rayonnante.

Les recherches qui ont établi ces résultats ont aussi prouvé qu'en général les gaz élémentaires sont largement transparents à la chaleur rayonnante. Ceci, à son tour, conduit à la preuve de la diathermancie des *liquides* élémentaires, comme le brome et les *solutions* des éléments solides, le soufre, le phosphore et l'iode. Vous avez devant vous un spectre, et vous constatez que le sulfure de carbone transparent n'a aucun effet sur les couleurs. Versez dans le liquide quelques paillettes d'iode, et vous verrez aussitôt le milieu du spectre supprimé. En augmentant la quantité d'iode, vous envahissez le spectre entier, et vous finissez par

le supprimer entièrement. Or cet iode, qui se montre lui-même si hostile à la lumière, est parfaitement transparent à l'émission ou radiation ultra-rouge, émission à laquelle nous avons affaire à présent. L'iode nous servira donc de filtre ou tamis des rayons.

Plaçant de nouveau une auge d'alun en avant de la lampe électrique, nous nous assurons comme auparavant de l'entière impuissance de la lumière concentrée à enflammer le papier blanc. Nous introduisons une seconde auge contenant la solution d'iode, et la lumière est complétement supprimée; nous écartons l'auge d'alun, et nous voyons le papier placé au foyer obscur prendre feu instantanément. Le papier noir est plus absorbant que le papier blanc pour les rayons ultra-rouges, et la conséquence est qu'avec lui la soudaineté et la vigueur de la combustion sont augmentées. Le zinc prend feu à la même place, le magnésium subit une combustion vive, tandis qu'une feuille de platine platiné, placée à ce foyer, est chauffée à blanc.

Regardé à travers un prisme, le platine chauffé à blanc donne toutes les couleurs du spectre. Avant de tomber sur le platine, les ondes étaient de vibrations trop lentes pour exciter la vision; par les atomes du platine, ces ondes longues et lentes sont brisées en ondes plus courtes, et ramenées ainsi dans la classe des rayons visuels. A l'autre extrémité du spectre, M. Stokes, par l'interposition d'une substance convenable, *abaissait* la réfrangibilité de manière à rendre visibles les rayons non visibles, et il avait donné à ce changement le nom de *fluorescence*. Ici, par l'intervention du platine, la réfrangibilité est *élevée* de manière à rendre visibles les rayons non visibles, et nous donnons à ce changement le nom de *calorescence*.

A ce foyer parfaitement invisible, où ces effets sont produits, l'air peut être aussi froid que la glace. L'air, comme on l'a déjà établi, n'absorbe pas la chaleur rayonnante, et, par conséquent, il n'est pas chauffé par elle. Rien ne peut mieux mettre en évidence l'état d'isolement, si je puis me servir de ce mot, dans lequel l'éther lumineux se trouve par rapport à l'air. Le mouvement ondulatoire de l'un est encaissé sans aucun effet sensible dans l'autre. Je puis ajouter qu'avec des précautions convenables l'œil pourrait être placé au sein d'un foyer capable de chauffer le platine au blanc vif, sans éprouver aucun dommage ou la plus légère sensation de lumière ou de chaleur.

Le rôle important joué dans la Nature par ces rayons ultra-rouges peut être mis en évidence de la manière suivante : j'éloigne le filtre d'iode et je concentre la totalité du faisceau sur une éprouvette contenant de l'eau. L'eau commence immédiatement à s'agiter et, après une minute ou deux, elle *entre en ébullition*. Qu'est-ce qui la fait bouillir ? Si je place la solution d'alun en avant de la lampe, l'ébullition cesse instantanément. Or l'alun est perméable aux rayons lumineux : ce ne sont donc pas ces rayons qui causent l'ébullition. J'introduis la solution d'iode et j'écarte l'alun : une vigoureuse ébullition recommence instantanément au foyer invisible. Force est donc d'attribuer l'échauffement de l'eau aux rayons invisibles.

Nous voici maintenant en état de comprendre le rôle si important joué par ces rayons dans la Nature. C'est à eux que nous devons l'échauffement et, par conséquent, l'évaporation des eaux de l'Océan des tropiques ; c'est à eux, par conséquent, que nous devons nos pluies et nos neiges. Ils sont absorbés près de la surface de l'Océan et chauffent l'eau superficielle, tandis que les rayons lumineux plongent

à de grandes profondeurs sans produire d'effet sensible. Mais nous pouvons aller plus loin encore : voici un grand flacon contenant un mélange réfrigérant qui a tant refroidi le flacon que la vapeur aqueuse de l'air s'est condensée et congelée sur elle, sous forme de farine blanche. Introduisant l'auge d'alun et plaçant la couche de gelée blanche au foyer de lumière intense, il ne se fond pas une petite aiguille de givre. Introduisant l'auge d'iode, et écartant celle d'alun, on voit se fondre instantanément un large espace de la couche gelée. Nous concluons de là que la neige et la glace qui alimentent le Rhône, le Rhin et les autres rivières qui ont leur source dans les glaciers sont libérées de leur emprisonnement sur les montagnes par les rayons ultra-rouges du Soleil.

La science croît comme un corps organisé. Ce qui aujourd'hui est une *fin* sera demain un *moyen* vers une fin plus éloignée. Chaque découverte nouvelle dans les sciences devient immédiatement la base d'autres découvertes ou de nouvelles méthodes d'investigation. Ainsi, il y a cinquante ans, Œrsted, de Copenhague, découvrit la déviation de l'aiguille magnétique par le courant électrique, et en même temps Thomas Seebeck, de Berlin, découvrit la thermo-électricité. Ces grandes découvertes furent mises à profit très-peu de temps après par Nobili et Melloni dans la construction d'un instrument qui a grandement augmenté nos connaissances de la chaleur rayonnante. Cet instrument, appelé *pile thermo-électrique*, consiste dans des barreaux minces de bismuth et d'antimoine, soudés alternativement ensemble à leurs extrémités, mais séparés partout ailleurs les uns des autres. Des extrémités de cette *pile* partent des fils de cuivre qui vont à un galvanomètre formé d'une

bobine de fil de cuivre recouvert de soie ou de coton, au-dessus et au dedans de laquelle sont suspendues deux aiguilles magnétiques formant un système rigide et soigneusement défendues des courants de l'air.

L'effet de cet arrangement est celui-ci : la chaleur tombant sur la pile produit un courant électrique; le courant passant à travers le fil fait dévier les aiguilles, et la grandeur de la déviation donne la mesure de la chaleur. L'aiguille supérieure se meut sur un cadran divisé, trop petit pour être vu. Au-dessus est une lentille, laquelle, si on la laissait fonctionner, projetterait au plafond une image de l'aiguille et du cadran, où, cependant, elle ne serait pas encore vue facilement. On reçoit donc d'abord le faisceau sur un miroir placé sous l'angle voulu, et qui projette l'image sur l'écran. De cette manière, les mouvements de la petite aiguille sont rendus visibles à tous.

La délicatesse de cet appareil est telle, que dans une salle remplie comme celle-ci l'est, au sein d'un auditoire physiquement chaud, il est très-difficile d'opérer avec lui. Mon préparateur est debout, à plusieurs mètres de moi; je tourne la pile vers lui : la chaleur de son visage, même à cette distance, produit une déviation de 90 degrés; je tourne l'instrument vers un mur éloigné que je juge être un peu au-dessous de la température moyenne de la salle : l'aiguille retombe et passe de l'autre côté du zéro, attestant par cette déviation que la pile sent le froid du mur. En possession de cet instrument, de notre filtre ou tamis des rayons et de notre large prisme de Nicol, nous sommes en mesure d'examiner un sujet de physique philosophique de grand intérêt, et sur lequel l'attention du plus éminent parmi les pionniers de la science s'est longtemps arrêtée, l'*identité substantielle de la lumière et de la chaleur rayonnante.*

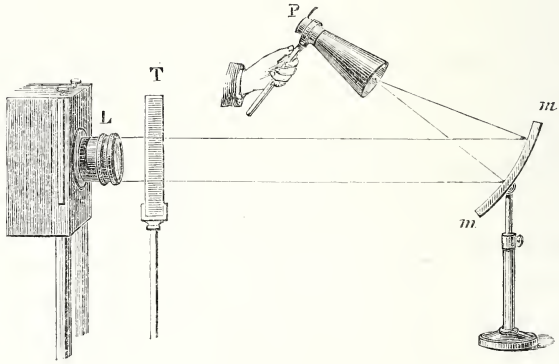
Qu'elles soient identiques sous *tous* les rapports, cela ne peut pas être, car si elles l'étaient elles agiraient de la même manière sur tous les instruments, l'œil compris. L'identité dont il s'agit ne peut être que celle qui existe entre une couleur et une autre, et qui fera qu'elles se comportent de la même manière en ce qui regarde la réflexion, la réfraction, la double réfraction et la polarisation. Qu'il nous soit permis de constater rapidement leurs ressemblances. En ce qui regarde la réflexion par des surfaces planes, nous pouvons employer pour réfléchir la lumière un miroir plan. Marquons un point quelconque sur la trace du rayon réfléchi, et supprimons la lumière à l'aide de la solution d'iode; plaçons la pile au point marqué : l'aiguille immédiatement s'élance de côté, montrant que la chaleur est réfléchie dans la même direction que la lumière. Cela est vrai pour toutes les positions du miroir. Reprenons, par exemple, les expériences faites avec l'appareil employé dans notre première leçon (*fig.* 3), en faisant mouvoir l'index attaché au miroir le long des divisions de l'arc divisé MO, et déterminant avec la pile les positions du rayon invisible réfléchi, nous prouverons que la vitesse angulaire du faisceau est double de celle du miroir.

Pour ce qui regarde la réflexion par les surfaces courbes, l'identité subsiste de même. Si nous recevons le faisceau réfléchi de notre lampe électrique sur un miroir concave *mm* (*fig.* 52), elle est diffusée sous forme d'un cône de lumière réfléchie; marquons le sommet de ce cône par un objet quelconque, et supprimons la lumière par la solution d'iode T; l'exposition, pendant un instant, de la pile au point marqué produit une violente déviation de l'aiguille.

La réflexion ordinaire et totale du faisceau de chaleur

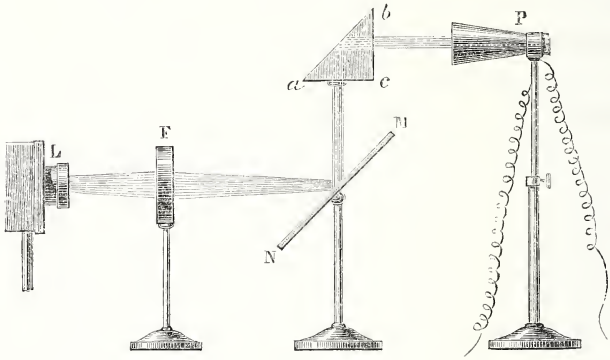
rayonnante peut être démontrée à la fois. De l'ouverture L de la lampe (*fig.* 53), un faisceau lumineux tombe

Fig. 52.




sur un miroir plan MN; il est réfléchi en haut, et entre dans un prisme à angle droit dont *abc* est la coupe. Il

Fig. 53.




rencontre l'hypoténuse sous une obliquité plus grande que l'angle limite; il est, par conséquent, réfléchi totalement. Supprimons la lumière à l'aide du filtre-rayon dressé en F

et plaçons la pile en P, le rayon de chaleur réfléchi totalement tombe sur la pile, et manifeste sa présence par la déviation galvanométrique.

Aucune expérience, peut-être, ne prouve d'une manière plus décisive l'identité substantielle de la lumière et de la chaleur rayonnante que la formation de l'image de la chaleur invisible. En employant le miroir déjà mis en usage pour amener le faisceau lumineux à son plus haut degré de concentration, nous obtenons, comme on le sait, l'image renversée des pointes de charbon, formée au foyer par les rayons lumineux. Supprimant la lumière à l'aide du filtre des rayons,

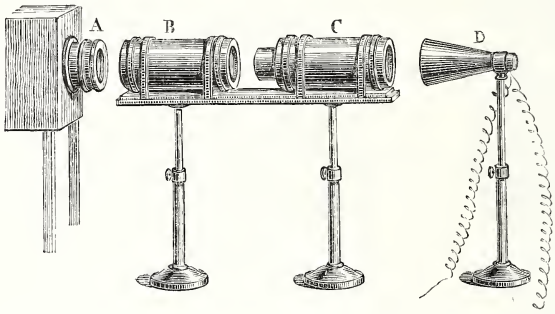
Fig. 54.

et plaçant au foyer une lame mince de platine platiné, nous voyons les rayons invisibles déclarer leur présence et leur distribution en imprimant sur le platine chauffé à blanc une image visible des pointes de charbon (*fig.* 54).

La chaleur rayonnante est-elle ou non susceptible de polarisation? Cette question fut d'abord controversée pendant assez longtemps. Bérard avait annoncé un résultat affirmatif, mais Baden-Powel et Lloyd le soumirent à l'épreuve sans pouvoir le vérifier. Les doutes ainsi jetés sur la question furent levés par l'expérience de Forbes qui établit le premier la *polarisation* et la *dépolarisation* de la chaleur. Ce sujet devint ensuite l'objet des études de Melloni, expérimentateur d'une habileté consommée, qui se servit

très-judicieusement, pour le mettre en évidence, de sa propre découverte, que les rayons obscurs des sources lumineuses sont transmis en partie par le verre noir. En interceptant par une plaque de ce verre la lumière de la flamme de sa lampe à huile, et opérant sur le rayon transmis de chaleur invisible, il obtint des effets de polarisation excédant de beaucoup en grandeur ceux qu'il obtenait avec les sources non lumineuses. En possession maintenant de notre filtre-rayon plus parfait et d'une source de chaleur plus

Fig. 55.




puissante, nous sommes en état de poursuivre la question de cette identité dans ses derniers retranchements.

Montons nos deux prismes de Nicol B et C (*fig.* 55) en avant de la lampe électrique, avec leurs sections principales en croix : aucune lumière n'arrive à l'écran. Plaçons notre pile thermo-électrique D derrière les prismes, avec sa face tournée vers la source : on n'observe aucune déviation du galvanomètre. Interposons entre la lampe A et le premier prisme B notre filtre-rayon : nous éteignons la lumière transmise auparavant par le premier Nicol, et maintenant la plus petite rotation de l'un ou l'autre des prismes de Nicol ouvre la voie à la transmission de la chaleur; il

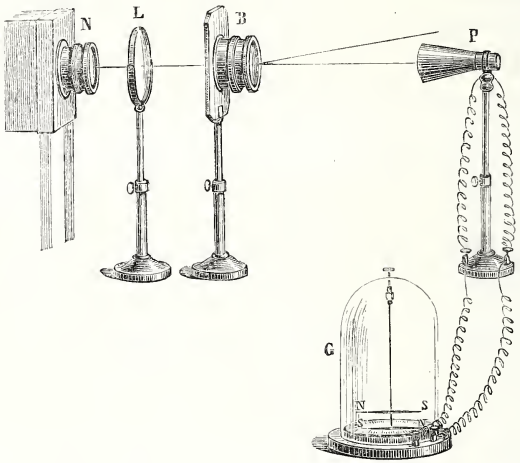
suffit d'une rotation très-petite pour renvoyer l'aiguille à 90 degrés. Lorsque le prisme de Nicol est ramené à sa première position, l'aiguille retombe de nouveau à zéro, mettant ainsi en évidence de la manière la plus nette la polarisation de la chaleur.

Lorsque les Nicols sont en croix et que le champ est obscur, vous savez, dans le cas de la lumière, l'effet produit par l'introduction d'une plaque de mica entre le polariseur et l'analyseur. Dans deux positions, ce mica n'exerce pas d'action sensible : il en exerce une dans les autres. Dans le cas de la lumière obscure, on observe une action rigoureusement analogue. J'introduis le filtre-rayon : la pile thermo-électrique, jouant le rôle de l'œil relativement à la radiation invisible, ne reçoit aucune chaleur quand l'œil ne reçoit aucune lumière ; mais lorsqu'on fait tourner la lame de mica de telle sorte que ses plans de vibration deviennent obliques à ceux du polariseur et de l'analyseur, la chaleur passe immédiatement. Cette action du mica est si énergique, qu'il suffit de plonger momentanément la lame de mica dans l'espace obscur compris entre les Nicols pour renvoyer l'aiguille à 90 degrés. C'est l'effet auquel on a donné le nom de *dépolarisation*. L'expérience prouve réellement qu'avec la lumière et la chaleur nous obtenons les mêmes effets de décomposition par la plaque de mica, et de recomposition par l'analyseur des vibrations éthérées.

Retirant le mica et ramenant encore l'aiguille à zéro, j'introduis entre les Nicols une plaque de quartz taillée perpendiculairement à l'axe. La déviation immédiate de l'aiguille annonce la transmission de la chaleur, et, lorsqu'on examine convenablement le rayon transmis, on trouve qu'il est polarisé circulairement, exactement comme l'est un rayon de lumière dans les mêmes conditions.

J'abandonne maintenant les prismes de Nicol, et j'envoie notre rayon tamisé de chaleur invisible à travers le parallélépipède de spath d'Islande B (*fig.* 56) déjà employé pour mettre en évidence la double réfraction de la lumière. Pour déterminer les positions des deux images, opérons d'abord sur le faisceau total. Marquons les lieux des images lumineuses (*fig.* 56), introduisons entre N et L notre filtre-

Fig. 56.




rayon non indiqué sur la figure, et supprimons ainsi la lumière. Approchons la pile de l'un des points marqués : l'aiguille demeure immobile tant que ce point n'est pas atteint ; mais en ce point la pile met la chaleur en évidence. Faisons avancer la pile à travers l'espace qui sépare les deux marques ; l'aiguille tombe de nouveau à zéro, puis s'élance de nouveau à 90 degrés dans la seconde position.

Je fais maintenant tourner sur lui-même le spath d'Islande, l'aiguille demeure fixe : il n'y a pas d'altération dans la déviation. Ramenant rapidement la pile devant l'autre

marque, la déviation subsiste. Je fais tourner encore le spath d'Islande, l'aiguille retombe à zéro, mais pour s'élever de nouveau à 90 degrés quand le prisme a tourné de 360 degrés. Nous savons que, dans le cas de la lumière, le rayon extraordinaire tourne autour du rayon ordinaire, et nous venons précisément d'opérer sur le rayon de chaleur extraordinaire, lequel, en ce qui concerne la double réfraction, se comporte exactement comme un rayon de lumière.

Pour compléter notre série de comparaisons, nous avons à mettre en évidence la magnétisation de la chaleur; mais il sera nécessaire, cette fois, d'apporter quelque modification à la disposition de nos appareils. Pour répéter l'expérience de Faraday sur la magnétisation de la lumière, nous placions d'abord nos deux Nicols en croix et nous rendions le champ obscur; une nappe de lumière apparaissait sur l'écran lorsque l'aimant devenait actif. Or la quantité de lumière transmise dans ce cas était réellement très-petite, et son effet n'était rendu frappant que par contraste avec l'obscurité précédente. Lorsque nous plaçons les prismes de Nicol de telle sorte que leurs sections principales comprennent un angle de 45 degrés, l'excitation de l'aimant produit une augmentation positive de lumière beaucoup plus grande, quoique cette augmentation ne soit pas rendue aussi sensible par l'effet de contraste, puisqu'au départ le champ était illuminé.

En essayant de magnétiser notre faisceau de chaleur, nous adopterons cet arrangement. Ici, toutefois, au début, une quantité considérable de chaleur tombe sur une des faces de la pile, et il faut nécessairement la neutraliser en amenant les rayons d'une autre source à tomber sur l'autre face de la pile. L'aiguille est ainsi ramenée à zéro. Éteignant la lumière par le filtre des rayons et excitant l'ai-

mant, on voit que l'aiguille est instantanément déviée, prouvant ainsi que l'aimant a ouvert la porte à la chaleur, exactement comme dans l'expérience de Faraday il ouvrait la porte à la lumière. Ainsi, dans tous les cas que nous venons de signaler, l'identité substantielle de la lumière et de la chaleur rayonnante a été clairement mise en évidence.

Ce fut par les expériences plus délicates de Knoblauch, qui étudia cette question longtemps et avec succes, que la double réfraction de la chaleur par le spath d'Islande fut démontrée pour la première fois ; mais quoiqu'il employât la chaleur lumineuse du Soleil, les déviations observées étaient excessivement petites. De même, les éminents expérimentateurs de la Provostaye et Desains réussirent à magnétiser un faisceau de chaleur ; mais, quoiqu'ils eussent aussi employé la chaleur lumineuse solaire, les déviations obtenues ne s'élevaient pas à plus de quelques degrés. Avec les dispositions dont nous faisons usage ici, on peut obtenir avec la chaleur invisible pure des déviations égales à 150 des degrés les plus bas du galvanomètre.

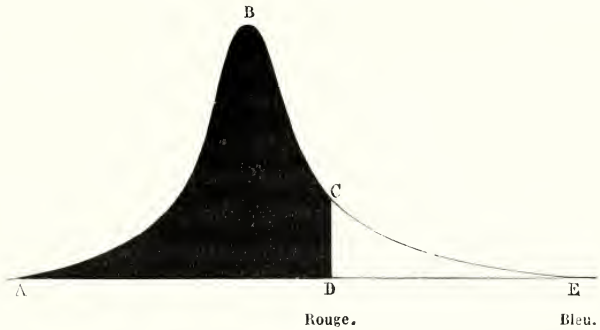
Nous avons enfin à déterminer la position et l'étendue de la radiation invisible qui produit ces résultats. Dans ce but, nous aurons recours à une pile thermo-électrique de forme particulière. Sa face est un rectangle que des pièces latérales mobiles peuvent rendre aussi étroite qu'on peut le désirer. Projetant sur l'écran un spectre petit et concentré, nous faisons passer la pile rectangulaire à l'aide d'une vis sans fin sur le spectre entier, et nous déterminons successivement le pouvoir thermique de toutes ses couleurs.

Lorsque cet instrument est amené à l'extrémité violette du spectre, la chaleur est trouvée à peu près insensible. A mesure que la pile s'éloigne du violet vers le rouge, elle

rencontre une chaleur sans cesse croissante. Le rouge lui-même possède le pouvoir calorifique le plus élevé de toutes les couleurs du spectre. Poussons la pile dans l'espace obscur au delà du rouge, la chaleur croît subitement en intensité, et à quelque distance au delà du rouge elle atteint son maximum. A partir de ce point, elle tombe un peu plus rapidement qu'elle ne s'était élevée, et s'éteint ensuite graduellement.

Tirons une ligne horizontale pour représenter la lon-

Fig. 57.




gueur du spectre, et élevons sur cette ligne à ses différents points des perpendiculaires de longueurs proportionnelles à la chaleur constatée en ces points, nous obtiendrons une courbe qui montre la distribution de la chaleur dans notre spectre. Elle est représentée dans la figure ci-jointe. Commençant au bleu, la courbe s'élève d'abord assez lentement et graduellement; vers le rouge, elle monte plus vite. La ligne CD (*fig.* 57) représente l'intensité de la radiation rouge extrême. Au delà du rouge, elle s'élève rapidement de manière à former un pic roide et massif en B; de là, elle tombe, rapidement d'abord, puis lentement, et devient de plus en plus insensible à la perception de la pile. Cette

figure est le résultat de plus de douze séries de mesures prises avec soin, et pour chacune desquelles on a construit sa courbe. En superposant toutes ces courbes, on a constaté entre elles un accord très-satisfaisant. On peut ainsi conclure sûrement que les aires des espaces noirs et blancs représentent les énergies relatives des radiations visible et invisible; l'une, la seconde, est 7,7 fois l'autre.

Mais, comme nous l'avons déjà dit, la vitalité ou la vérité de la Science repose tout entière sur l'exactitude des vérifications. Si nous déterminons en premier lieu l'émission totale de notre lampe électrique; qu'ensuite, par le moyen de notre filtre iodé, nous déterminions l'émission ultra-rouge, la différence entre les deux doit donner l'émission lumineuse. On trouve de cette manière que l'énergie de l'émission invisible est huit fois celle de l'émission visible. Jamais deux méthodes n'ont été plus opposées l'une à l'autre, et jamais deux résultats ne se sont mieux accordés. Je pense, par conséquent, que vous pouvez vous fier à l'exactitude de la distribution assignée ici à la chaleur dans le spectre prismatique de la lumière électrique. Il n'y a rien de vague dans la méthode d'investigation ni rien de douteux dans les conclusions.

# SIXIÈME LEÇON.

Principes de l'analyse spectrale. — Analyse prismatique de la lumière des vapeurs incandescentes. — Spectres discontinus. — Preuves données par Bunsen et Kirchhoff que les raies sont caractéristiques des vapeurs. — Découverte du rubidium, du cœsium et du thallium. — Rapports de l'émission et de l'absorption. — Les raies de Fraunhofer. — Leur explication par Kirchhoff. — Chimie solaire comprise dans cette explication. — Expérience de Foucault. — Principes de l'absorption. — Analogies du son et de la lumière. — Démonstration expérimentale de cette analogie. Applications récentes de la spectroscopie. — Résumé et conclusion.

Nous avons pris pour notre source de lumière, dans ces Leçons, les extrémités de deux bâtons de charbon de cornue rendus incandescents par l'électricité. Le charbon de cornue est parfaitement approprié à ce but, parce qu'il peut supporter une grande chaleur sans fusion ou évaporation. Il est de plus noir, ce qui vient en aide à la lumière; en effet, les autres circonstances restant les mêmes, M. le professeur Balfour Stewart a démontré que plus un corps est noir, plus sa lumière est blanche quand il est rendu incandescent. Toutefois, quelque réfractaire que soit le carbone, si nous examinions attentivement notre arc voltaïque ou le flux de lumière entre les pointes de charbon, nous y trouverions de la vapeur de carbone, et si nous pouvions détacher la lumière de cette vapeur de la lumière plus éblouissante des pointes solides, nous trouverions que son spectre est non-seulement moins brillant, mais d'un

caractère totalement différent de celui des spectres que nous avons déjà vus. Au lieu d'être une succession non interrompue de couleurs du rouge au violet, la vapeur de carbone présenterait des bandes colorées avec des espaces sombres entre elles.

Ce qui est vrai du carbone est vrai dans un degré plus frappant encore des métaux, dont les plus réfractaires peuvent être fondus, amenés à l'ébullition et réduits en vapeur par le courant électrique. La lumière issue des vapeurs incandescentes, en règle générale, brille sous forme de groupes de raies de degrés définis de réfrangibilité, avec des espaces entre les groupes successifs qui ne sont comblés par des raies d'aucune sorte; mais la contemplation des faits rendra ce sujet plus intelligible que ne pourraient le faire des mots. Au sein de la lanterne, on vient de placer un cylindre de charbon de cornue creusé à son sommet pour recevoir un petit morceau de métal : dans le creux on a placé un fragment du métal thallium; nous abaissons sur ce fragment la pointe du charbon supérieur, puis nous séparons les deux charbons l'un de l'autre. Un flux de vapeur de thallium incandescent coule entre eux, et l'on voit son image amplifiée actuellement projetée sur l'écran : elle est d'une belle couleur verte. Que signifie ce vert? Nous répondons à cette question en soumettant cette lumière à l'analyse prismatique. Voici son spectre formé d'une simple bande réfractée : c'est de la lumière d'un seul degré de réfrangibilité, et de la réfrangibilité correspondant au vert, émise par la vapeur du thallium.

Nous enlevons le thallium et nous mettons à sa place un morceau d'argent. L'arc de l'argent ne se distingue pas à la vue de celui du thallium. Sont-ils semblables? L'analyse prismatique nous permet de répondre à cette question. Il

est parfaitement impossible de confondre le spectre de la vapeur d'argent incandescent avec celui du thallium. Ici l'on voit deux bandes vertes au lieu d'une seule.

Ajoutons à l'argent dans le creux du charbon un morceau de thallium, nous devrons avoir la lumière des deux métaux; et voici qu'après un court instant d'attente nous voyons le vert du thallium à moitié chemin entre les deux verts de l'argent. Mais vous observez un autre fait intéressant : la bande de thallium est d'abord plus brillante que les raies de l'argent. En effet, les deux dernières ont dégénéré d'une manière frappante depuis qu'on a placé le morceau de thallium dans le creux, et cela pour une raison bien connue : c'est la *résistance* offerte au passage du courant électrique d'un carbone à l'autre qui fait naître la puissance du courant à engendrer la chaleur. Si cette résistance est matériellement abolie, la chaleur diminue matériellement, et si toute résistance était abolie, il n'y aurait plus de lumière du tout. Cela posé, le thallium est un métal beaucoup plus fusible et plus vaporisable que l'argent, et sa vapeur facilite le passage du courant à un degré tel, qu'il est à peu près impuissant à vaporiser l'argent plus réfractaire; mais le thallium se consume peu à peu, sa vapeur diminue, la résistance augmente, et vous revoyez enfin les deux bandes de l'argent aussi brillantes qu'elles l'étaient d'abord [1].

Nous avons dans ces raies un caractère parfaitement inaltérable de ces deux métaux. Nous n'obtiendrons jamais de l'argent d'autres bandes que ces deux vertes seules, et jamais du thallium d'autre bande que cette seule raie verte,

---

[1] Cette circonstance ne doit pas être perdue de vue dans l'examen des spectres composés.

ni jamais d'autres bandes que ces trois bandes vertes du mélange des deux métaux. Chaque métal connu a ses bandes propres particulières, et dans aucun cas connu les bandes de deux métaux différents ne sont semblables en réfrangibilité. Il en résulte, par conséquent, que ces spectres sont un moyen sûr d'épreuve de la présence ou de l'absence d'un métal particulier quelconque.

Si nous passons des métaux à leurs alliages, nous n'éprouverons aucune confusion : le cuivre donne trois raies vertes; le zinc donne des bandes bleues et rouges; le laiton, alliage de cuivre et de zinc, donne les bandes de ces deux métaux, parfaitement inaltérées dans leur caractère et leur position.

Mais nous ne sommes pas confinés aux métaux eux-mêmes : les sels de ces métaux donnent les bandes des métaux. L'union chimique est rompue par une chaleur suffisamment élevée; la vapeur du métal est mise en liberté et montre ses raies caractéristiques. Les chlorures des métaux sont particulièrement convenables pour des expériences de ce genre. Le sel commun, par exemple, est un composé de chlore et de sodium; dans la lampe électrique, il montre le spectre du métal sodium. Les chlorures du cuivre, du lithium, du strontium fournissent de la même manière les bandes de ces métaux.

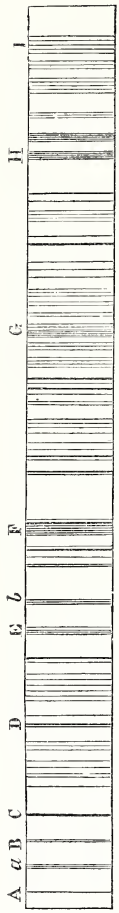
Quand, par conséquent, Bunsen et Kirchhoff, les célèbres fondateurs de l'*analyse spectrale,* après avoir établi par un examen approfondi les spectres de toutes les substances connues, découvrirent un spectre contenant des raies différentes de toutes les raies obtenues, ils en conclurent immédiatement l'existence d'un nouveau métal. Ils opéraient alors sur des résidus provenant de l'évaporation des eaux minérales de l'Allemagne. Ils reconnurent que ce

métal inconnu était caché dans cette eau ; mais quelle grande quantité de cette eau faudrait-il faire évaporer avant d'obtenir un résidu assez abondant pour mettre la Chimie ordinaire en mesure d'isoler ce métal ! Ils se mirent cependant à sa recherche, et il a pris rang aujourd'hui parmi les corps simples métalliques sous le nom de *rubidium*. Ils découvrirent plus tard un second métal qu'ils appelèrent *cæsium*. Ainsi, après avoir placé l'analyse chimique sur un fondement sûr, ils furent assez heureux pour démontrer sa valeur comme agent de découvertes. Aussitôt après, M. Crookes, mettant en œuvre la même méthode, découvrit la bande verte du thallium, et obtint les sels du métal qui l'avait fournie. Le métal lui-même a été isolé par M. Lamy, un chimiste français.

Tout ceci se rapporte à des découvertes chimiques faites à la surface de la Terre, dont les matériaux sont sous notre main ; mais on comprit bientôt que l'analyse spectrale pouvait être appliquée à l'examen du Soleil et des étoiles, et ce résultat fut atteint par la solution d'un problème qui a été longtemps une énigme pour les physiciens. Nous allons essayer actuellement de faire comprendre la portée de ce problème et des conquêtes dont il a été l'occasion. Un spectre est pur lorsque les couleurs n'empiètent pas l'une sur l'autre. Nous purifions le spectre en faisant notre fente suffisamment étroite, et en augmentant le nombre de nos prismes. Lorsqu'on a obtenu de cette manière un spectre pur du Soleil, on trouve qu'il est sillonné par des raies noires innombrables. Quatre d'entre elles furent d'abord aperçues par Wollaston ; elles furent ensuite mises en évidence en plus grand nombre par Fraunhofer avec une habileté si magistrale, qu'elles sont aujourd'hui connues universellement sous le nom de *raies de Fraunhofer*. Donner l'explication de ces

raies était, comme je l'ai dit, un problème qui arrêta longtemps l'attention des physiciens, et l'honneur de l'avoir résolu le premier revient à M. Kirchhoff, professeur de Physique à l'Université de Heidelberg.

Fig. 58.




Les positions des principales raies désignées par les lettres de Fraunhofer sont figurées dans le dessin ci-joint (*fig.* 58) du spectre solaire. A est supposé placé près du rouge extrême, et I près de l'extrémité violette.

Le court Mémoire de deux pages dans lequel cette importante découverte est décrite fut communiqué à l'Académie des Sciences de Berlin le 27 octobre 1859. Fraunhofer avait remarqué, dans le spectre de la flamme d'une chandelle, deux raies brillantes qui coïncidaient exactement en position avec la double raie obscure D du spectre solaire. Ces deux raies brillantes sont produites avec une intensité particulière par la flamme jaune dérivée d'un mélange de sel et d'alcool : ce sont de fait les raies de la vapeur de sodium. Kirchhoff produisit un spectre en faisant entrer la lumière du Soleil dans sa lunette à travers une fente et un prisme, et en face de la fente il plaça la flamme jaune du sodium. Aussi longtemps que le spectre resta faible, il vit toujours apparaître les deux raies brillantes dérivées de la flamme du sodium, à la place des deux raies sombres D du spectre solaire. Dans ce cas, une absorption semblable à celle que la flamme exerçait sur la lumière du Soleil était plus que compensée par la radia-

tion de la flamme du sodium; mais, lorsque le spectre solaire était rendu suffisamment intense, les raies brillantes s'évanouissaient tout à coup, et les deux raies sombres de Fraunhofer se montraient beaucoup plus nettes et plus distinctes que lorsqu'on n'employait pas la flamme.

Ce résultat, il importe de le faire remarquer, n'était pas dû à une extinction réelle des raies brillantes de la flamme, mais à l'augmentation d'intensité du spectre adjacent. L'expérience prouva démonstrativement que, lorsque la lumière blanche envoyée à travers la flamme était suffisamment intense, la quantité que la flamme absorbait était fort en excès sur la quantité qu'elle rayonnait.

Voilà donc un résultat d'une très-grande signification. Kirchhoff en conclut immédiatement que la flamme de l'alcool salé, capable de rendre intenses d'une manière si remarquable les raies sombres de Fraunhofer, devait pouvoir les produire. On sait que le spectre de la lumière Drummond montre les deux raies brillantes du sodium, lesquelles cependant disparaissent à mesure que la petite quantité de sodium contenue à l'état d'impureté dans la chaux incandescente est épuisée. Kirchhoff forma un spectre avec la lumière de la chaux, et, après que les deux raies brillantes se furent évanouies, il plaça sa flamme d'alcool salé en face de la fente. Les deux raies sombres D surgirent spontanément. Il évoqua ainsi artificiellement, dans le spectre continu de la lumière de la chaux, les raies D de Fraunhofer.

Kirchhoff comprit que ce n'était pas une action particulière à la flamme du sodium, et il étendit immédiatement ce résultat à toutes les flammes colorées qui contiennent dans leur spectre des raies nettement définies. La lumière blanche avec l'intégrité de ses rayons constituants, envoyée

à travers de semblables flammes, devait, concluait-il, perdre par absorption ceux de ses constituants dont les réfrangibilités sont les mêmes que celles de ces raies brillantes; de sorte que, après avoir passé à travers de semblables flammes, la lumière blanche, en la supposant suffisamment intense, devait avoir son spectre sillonné de raies sombres. Dans l'occasion que nous rappelons, Kirchhoff réussit aussi à renverser les raies brillantes du lithium.

La difficulté si longtemps debout des raies de Fraunhofer s'évanouit en présence de faits et d'arguments comme ceux-ci, qui entraînaient en même temps une extension incommensurable des ressources des chimistes. Kirchhoff vit que des raies de leur spectre, telles qu'elles sont montrées par les substances terrestres, on pouvait immédiatement conclure à la présence ou à l'absence de ces substances au sein du Soleil et des étoiles fixes. Ainsi la présence des raies noires D dans le spectre solaire prouve l'existence de la vapeur de sodium dans l'atmosphère solaire; tandis que les raies brillantes découvertes par Brewster dans la flamme du nitre, dont on a prouvé qu'elles coïncident exactement avec certaines raies sombres entre A et B dans le spectre solaire, prouvent l'existence du potassium dans le Soleil.

Toutes les recherches ultérieures vérifièrent l'exactitude de ces conclusions, qui parurent d'abord téméraires. Dans son second Mémoire communiqué à l'Académie de Berlin avant la fin de 1859, Kirchhoff prouva l'existence du fer dans le Soleil. Les raies brillantes du spectre de la vapeur du fer sont excessivement nombreuses, et Kirchhoff constata plus tard que 65 d'entre elles sont absolument identiques en position avec 65 raies sombres de Fraunhofer. Angström et Thalèn étendirent ces coïncidences à 450 raies pour le fer. D'après ces mêmes excellents explorateurs, les

nombres qui suivent expriment les coïncidences relatives à chacun des métaux correspondants :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Calcium ..... | 75 | Nickel..... | 33 |
| Baryum ..... | 11 | Cobalt..... | 19 |
| Magnésium... | 4 | Hydrogène.... | 4 |
| Manganèse ... | 57 | Aluminium.... | 2 |
| Titane..... | 118 | Zinc..... . | 2 |
| Chrome .... | 18 | Cuivre..... | 7 |

Il est extrêmement probable que toutes ces substances existent dans l'atmosphère du Soleil.

La découverte de Kirchhoff modifia profondément les idées entretenues jusque-là relativement à la constitution du Soleil, et elle conduisit sur cette constitution à des vues qui pourront être modifiées dans les détails, mais qui, je le crois, conserveront substantiellement leur valeur jusqu'à la fin des temps. Le Soleil consiste en un noyau entouré d'une atmosphère enflammée, de température plus basse. Le noyau peut être en partie formé de nuages, situés au-dessous de vapeur véritable. La lumière du noyau donnerait un spectre continu, comme les pointes de nos charbons; mais, forcés de passer à travers la photosphère, comme notre faisceau à travers la flamme de sodium, ceux de ces rayons du noyau que la photosphère peut elle-même émettre sont absorbés, et des lignes d'ombre correspondant aux rayons individuellement absorbés apparaissent dans le spectre. Supprimez le noyau du Soleil, et vous aurez un spectre qui montrera une raie brillante à la place de chacune des raies noires de Fraunhofer, absolument comme, dans le cas de la seconde expérience de Kirchhoff, nous aurions eu les raies brillantes du sodium, si l'on avait retiré la lumière de la chaux. Les raies de Fraunhofer ne sont

donc pas sombres absolument, mais sombres relativement, d'une quantité correspondant à la différence entre la lumière interceptée et la lumière émise par la photosphère.

On peut dire de presque toutes les grandes découvertes scientifiques que plusieurs esprits contemporains s'en sont approchés à la fois. Celui qui les fait ne fait ordinairement que projeter sur elles la clarté d'une démonstration que l'on doit considérer comme le produit non d'un génie isolé, mais d'un génie en avance sur les autres. Ainsi Foucault, en 1849, toucha aux frontières de la découverte de Kirchhoff. En faisant converger une image du Soleil sur un arc voltaïque, et obtenant le spectre des deux lumières superposées du Soleil et de l'arc, il trouva que les deux raies brillantes, qui, en raison de la présence à l'état d'impureté d'un peu de sodium dans le charbon ou dans l'air, sont ordinairement aperçues, coïncidaient avec les raies sombres D de Fraunhofer. Il trouva en outre que ces raies D sont considérablement renforcées par le passage de la lumière solaire à travers l'arc voltaïque.

Au lieu de l'image du Soleil, Foucault projeta sur l'arc l'image de l'une des pointes de charbon incandescent, laquelle donne par elle-même un spectre continu, et il trouva que les raies D étaient ainsi *engendrées*. La conclusion de cette admirable expérience de Foucault fut que l'arc est un milieu qui émet les raies D pour son propre compte, et en même temps les absorbe lorsqu'elles viennent d'une autre source. Il s'arrêta là, et n'étendit pas ses observations au delà de l'arc voltaïque ; il n'arriva ni à la conception de la chimie solaire, ni à la constitution du Soleil. Sa belle expérience resta à l'état de germe sans porter de fruits jusqu'à ce que, dix ans plus tard, l'étude attentive de la classe entière des phénomènes à laquelle elle ap-

partenait mît Kirchhoff en état de résoudre ce grand problème.

Peu après la publication de la découverte de Kirchhoff, M. le professeur Stokes, qui, dix ans avant cette découverte, l'avait à peu près réalisée de son côté, avait emprunté au son un fait très-propre à mettre en évidence la réciprocité de la radiation et de l'absorption. Une corde tendue répond aux vibrations de l'air synchroniques avec les siennes : un grand nombre de semblables cordes tendues à travers l'espace représenteraient grossièrement un milieu, et si l'on produisait à distance la note commune à toutes les cordes, elles absorberaient les vibrations relatives à cette note, c'est-à-dire qu'elles absorberaient les vibrations qu'elles émettent.

Lorsqu'on excite un diapason avec un archet, la chambre est immédiatement remplie d'un son musical ; ce son peut être regardé comme la radiation ou l'émission du son du diapason. Il y a peu de jours, en faisant résonner le diapason, je remarquai que, lorsque ses vibrations s'éteignaient, le son semblait se continuer, quoique plus faible. Le son m'apparaissait, en outre, sortir d'au-dessous d'une table placée à distance, et sur laquelle étaient placés un certain nombre de diapasons de différentes sortes et de différents tons. Un de ces diapasons, et un seul, avait été amené à vibrer par le diapason mis en vibration, et c'était celui dont la période de vibration était celle du diapason qui l'avait excité. C'est un exemple de l'*absorption* du son d'un diapason par un autre. Si nous plaçons à côté l'un de l'autre deux diapasons à l'unisson, et si, après avoir passé l'archet sur l'un d'eux, nous éteignons ses vibrations, l'autre continuera à résonner; le second excitera de nouveau le premier, et il peut se produire ainsi plusieurs transports ou

échanges de son entre les deux diapasons. En plaçant un centime sur les deux branches de l'un des diapasons, nous détruisons son synchronisme parfait avec l'autre, et il n'y a plus de communication de son de l'un à l'autre.

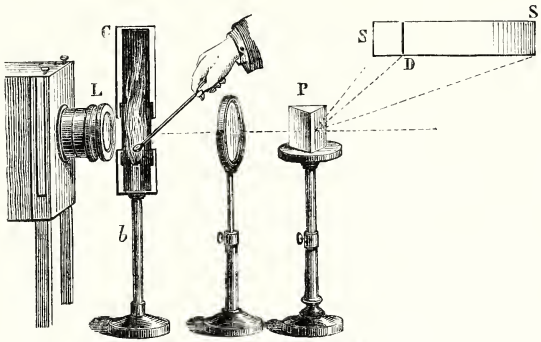
J'ai maintenant à vous démontrer, sur une échelle suffisante, que nous pouvons faire avec la lumière ce que nous avons fait avec le son. Plusieurs jours durant, en 1861, j'essayai de réaliser cet effet, mais je ne réussis qu'en partie. Je plaçais sur un disque de fer un mélange d'alcool et de sel dilué, et je le chauffais pour produire l'évaporation. Je mettais le feu à la vapeur, et, à travers la flamme jaune ainsi produite, je lançais le faisceau de la lampe électrique. Je n'obtenais qu'un faible obscurcissement de la bande jaune du spectre projeté. Je pris alors une grande auge, j'y versai le mélange d'alcool et de sel, et lorsqu'il fut allumé il me donna une flamme de plus de 3 mètres de haut; mais le résultat du passage de la lumière à travers cette épaisseur de flamme fut encore peu satisfaisant. Me rappelant que la combustion directe du sodium dans la flamme d'un bec de Bunsen produisait un jaune beaucoup plus intense que celui de la flamme d'alcool salé, et concluant que l'intensité de la couleur montre l'abondance de vapeur incandescente, j'envoyai à travers la flamme du sodium métallique le faisceau de la lumière électrique. Le succès fut complet, et c'est cette expérience que je tiens à répéter sous vos yeux [1].

---

[1] La bande obscure produite lorsque le sodium était placé au sein de la lampe (dans le creux de l'un des charbons) fut observée dans cette même occasion; ce fut alors aussi que fut remarquée pour la première fois la bande bleue du lithium que la flamme de Bunsen ne mettait pas encore en évidence.

Vous remarquez donc d'abord que, lorsqu'un fragment de sodium est placé au sein d'une cuiller mince et introduit dans la flamme de Bunsen non lumineuse, il se produit une lumière jaune intense, correspondant en réfrangibilité avec la bande jaune du spectre. Comme notre diapason, il émet des ondes d'une période spéciale. Lorsque la lumière blanche de la lampe électrique est envoyée à travers cette flamme, vous avez une preuve oculaire que la flamme jaune intercepte le jaune du spectre; en d'autres termes, qu'elle

Fig. 59.




absorbe les ondes de même période que la sienne, produisant ainsi, pour tous les besoins et toutes les applications qu'on en voudra faire, une raie noire de Fraunhofer à la place de la raie jaune.

En face de la fente L (*fig.* 59), par laquelle sort le faisceau lumineux, je place un bec de Bunsen *b*, protégé par une cheminée C. Le faisceau, après avoir traversé la lentille, traverse aussi le prisme P (dans l'expérience physique, il y a en réalité une couple de prismes). Là, elle est décomposée et forme sur l'écran un spectre continu très-vif. Si l'on introduit alors dans une petite cuiller une boulette

de sodium au sein de la flamme de Bunsen, le métal fond d'abord, colore la flamme en jaune intense, et enfin brûle avec une combustion violente. Au même moment le spectre est sillonné par la raie sombre D. En introduisant et retirant tour à tour la flamme du sodium dans une succession rapide, on voit apparaître et disparaître tour à tour la raie noire de la manière la plus frappante. Par contraste avec l'éclat adjacent, cette bande se montre absolument noire. Le noir cependant est seulement relatif, car une portion de la lumière de la flamme de sodium tombe sur l'espace sombre.

J'ai rappelé l'expérience de Foucault, mais d'autres expérimentateurs avaient aussi côtoyé les frontières de cette découverte avant qu'elles ne fussent franchies par Bunsen et Kirchhoff. J'ai déjà parlé ailleurs, et je reparle ici avec quelques modifications, des précurseurs de la découverte de l'analyse spectrale et de la chimie solaire. M. Talbot a observé les raies brillantes du spectre dans les flammes colorées; lui et sir John Herschel ont énoncé la possibilité de faire de l'analyse prismatique un moyen d'analyse chimique d'une délicatesse excessive, mais non pas, ils semblent le dire, d'une certitude entière. Plus d'un quart de siècle après, M. le docteur Miller publia les dessins et la description des spectres de diverses flammes colorées.

Wheatstone, avec sa finesse accoutumée, analysa la lumière de l'étincelle électrique et prouva que les métaux entre lesquels jaillit une étincelle électrique font naître dans le spectre des raies brillantes. Dans des recherches déclarées classiques par Kirchhoff, Swan avait montré que moins de $\frac{1}{2500000}$ de grain de sodium introduit dans la flamme de Bunsen pouvait être mis en évidence par son spectre. Il prouva aussi la constance des raies brillantes

dans les spectres des flammes des hydrocarbures. Masson, à l'occasion d'un concours, publia un Mémoire sur les bandes de l'étincelle d'induction, tandis que Van der Willigen, et plus récemment Plücker, ont aussi donné de très-beaux dessins des spectres provenant de la même source.

Mais aucun de ces hommes distingués n'a eu la moindre idée de la liaison entre les raies brillantes des métaux et les raies noires du spectre solaire ; et l'on ne pouvait pas dire que l'analyse spectrale eût été placée sur quelque chose de semblable à une base solide avant les recherches de Bunsen et Kirchhoff. L'homme qui, dans un Mémoire publié, approcha le plus près des principes philosophiques de la question, fut Angström. Dans le Mémoire traduit par moi et publié dans le *Philosophical Magazine* pour 1855, il indique que les rayons qu'un corps absorbe sont précisément ceux qu'il peut émettre quand il est rendu lumineux. Dans un autre endroit, il parle de l'un de ces spectres comme donnant l'impression générale du spectre solaire *renversé ;* mais ce Mémoire, tout scientifique qu'il soit, porte des traces distinctes des incertitudes de son temps. Foucault, Thomson et Balfour-Stewart ont tous été bien près de la découverte, tandis que, comme nous l'avons déjà dit, elle fut presque révélée par la conjecture ingénieuse, mais restée inédite, de Stokes.

Mentalement, aussi bien que physiquement, chacune des années de l'âge du monde est l'enfantement et le développement des années précédentes. La science prouve elle-même qu'elle est un produit légitime de la nature, en croissant conformément à ses lois. Il n'y a pas ici de solution de continuité. Toutes les grandes découvertes sont péniblement préparées de deux manières : d'abord par d'autres découvertes qui sont, elles, des préludes; et, secondement,

par l'exercice de l'intelligence chercheuse. Ainsi Ptolémée fut le couronnement d'Hipparque; Copernic d'Hipparque et de Ptolémée; Kepler de Copernic, d'Hipparque et de Ptolémée; Newton de ces quatre grands hommes. Newton ne s'éleva pas du niveau commun de l'intelligence à cette hauteur étonnante. Au temps où il apparut, le plateau des connaissances humaines était déjà élevé. Il s'élança, il est vrai, au-dessus de ce plateau comme un pic gigantesque, mais il était porté par ce plateau, et une grande partie de sa hauteur absolue est la hauteur de l'humanité de son temps. Il en a été ainsi de la découverte de Kirchhoff. On avait fait beaucoup avant lui, il se rendit maître du travail fait avant lui : il alla ensuite au delà par la force de son génie individuel. Il remplaça l'incertitude par la certitude, le vague par le défini, la confusion par l'ordre, et je ne crois pas que Newton eût des droits plus certains aux découvertes qui ont rendu son nom immortel que Kirchhoff au mérite d'avoir fait un corps de la science fragmentée de son temps, de l'avoir grandement étendue, et de lui avoir infusé la vie des grands principes.

Il nous suffira d'une petite addition pour terminer notre exposé des principes de la chimie solaire. A cause de la lumière dispersée par la matière en suspension mécanique dans l'atmosphère de la Terre, le Soleil n'est pas nettement défini; il se montre entouré d'une gloire lumineuse. Or un grand bruit couvre ou éteint un murmure, et une lumière intense éteint une lumière faible. Cette gloire circumsolaire nous empêche de voir les apparences si frappantes des bords du Soleil. La gloire est supprimée dans les éclipses totales, lorsque la Lune s'interpose entre le Soleil et la Terre, et l'on voit alors une série de protubérances rouges s'élançant quelquefois à plus de 10000 kilomètres au delà du bord

noir de la Lune. Elles ont été décrites par Vassenius dans les *Transactions philosophiques* de 1733, et très-probablement elles ont été observées plus tôt encore. En 1842, elles attirèrent grandement l'attention, et on les compara aux pics couverts de neige des Alpes, rendus écarlates par le soleil couchant. Que ces protubérances soient des gaz enflammés, et principalement du gaz hydrogène, M. Janssen l'a prouvé par ses observations de l'éclipse faites dans les Indes le 18 août 1868.

Mais les proéminences peuvent être rendues visibles en plein soleil, et pour une raison facile à comprendre. Vous avez vu que, dans ces Leçons, nous avons eu recours, pour produire le spectre, tantôt à un seul, tantôt à deux prismes. Dans le cas de deux prismes, la lumière blanche dispersée, distribuée ou répandue sur une aire double, a toutes ses couleurs diluées proportionnellement. Vous avez vu aussi que, pour produire les raies des vapeurs incandescentes, nous avons employé un double prisme; mais ici la lumière de chaque raie, absolument monochromatique, incapable d'une dispersion ultérieure par le second prisme, ne pouvait pas, par conséquent, être affaiblie par une dispersion ultétérieure.

Appliquez ces considérations aux régions circumsolaires. La gloire de lumière blanche autour du soleil peut être dispersée et affaiblie dans une proportion quelconque, en augmentant le nombre des prismes, tandis qu'une lumière monochromatique, mêlée à la lumière blanche de la gloire, gardera toute son intensité, que la dispersion n'a pas pu diminuer. C'est sur cette observation qu'est fondée la méthode d'observation appliquée indépendamment par M. Janssen dans l'Inde, par M. Lockyer en Angleterre, à l'aide de laquelle les bandes monochromatiques des protubérances

entrent dans notre possession et deviennent visibles en plein jour.

Ce serait dépasser le but de ces Leçons que de nous arrêter aux résultats nombreux, intéressants, importants, obtenus par MM. Secchi, Respighi, Young et les autres savants distingués qui ont étudié la chimie du Soleil et de ses appendices. Je ne puis non plus, à présent, que signaler en passant les excellentes recherches de M. le Dr Huggins, relativement aux étoiles fixes, aux nébuleuses, aux comètes. Elles ont mis en évidence, plus que toutes les autres, la vérité littérale de cette assertion, que l'établissement de l'analyse spectrale et l'explication des raies de Fraunhofer apportaient avec elles une extension incommensurable du domaine des chimistes. Mais mon but, ici, est de poser des principes clairs, plutôt que de suivre les détails de leurs applications. Cette dernière tâche n'exige que du temps pour être bien accomplie; mais elle en exige plus que je n'en ai maintenant à ma disposition.

# RÉSUMÉ ET CONCLUSION.

Mon désir, dans ces Leçons, a été de vous montrer, sans rompre autant que possible les règles de la continuité, quelque chose de l'aspect actuel d'une des branches de la science à laquelle se sont consacrées quelques-unes des plus grandes intelligences que le monde ait jamais vues. Mon ami, M. le professeur Henri, en me présentant à Washington, a parlé de moi comme d'un apôtre ; mais le seul apostolat que j'aspirais à exercer était de poser mon sujet devant vous en termes clairs, et de le laisser ensuite exercer lui-même sur vos esprits ses attractions intrinsèques. J'ai cherché à donner à chacune de mes expériences une valeur intellectuelle distincte, car l'expérience doit être la représentation et l'expression de la pensée, un langage adressé à l'œil, comme les mots sont un langage adressé à l'oreille. Quand on l'associe bien au discours, rien ne fait plus d'impression et n'instruit mieux qu'une expérience appropriée; mais, en outre de son association au discours, elle sert mieux le but de surprise que se propose un enchanteur que le but d'éducation qui doit être la règle et le mobile du savant.

Cela posé, un court résumé de notre œuvre ne sera pas déplacé. Notre prise de possession des lois et des phénomènes de la lumière a son origine dans le désir de connaître inné à l'homme. Nous avons vu que ce problème avait préoccupé les anciens; mais comme un enfant qui fait usage de ses bras sans but, par besoin d'exercice musculaire, qui est

pour lui une nécessité, ces hommes primitifs n'avaient sur la lumière que des idées vagues et confuses ; ils n'étaient pas soumis, comme maintenant, à une sage discipline qui les aurait obligés à donner de la clarté à leur perception et de la fermeté à leur étreinte des principes. Ils s'assurèrent par eux-mêmes de la propagation rectiligne de la lumière, et que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

Pendant plus de mille ans, je pourrais dire en réalité pendant plus de quinze cents ans, l'intelligence scientifique se montra comme frappée de paralysie ; parce que, de fait, pendant cette longue période de temps, la force mentale qui aurait pu s'exercer dans la direction de la science avait pris une autre direction.

Le cours de l'investigation, en ce qui regarde la lumière, futrep ris en 1100 par un philosophe arabe appelé Alhasan. Il fut ensuite suivi successivement par Roger Bacon, Vitellius et Kepler. Ces hommes, quoiqu'ils ne réussirent pas à découvrir les principes qui gouvernaient les faits, tinrent le feu de l'investigation constamment allumé. Vint ensuite la découverte fondamentale de Snell, cette pierre angulaire de l'optique ; nous avons eu plus tard l'application, par Descartes, de la découverte de Snell à l'explication de l'arc-en-ciel. Puis vint la réfutation, par Rœmer, de l'idée de Descartes, que la lumière était transmise instantanément à travers l'espace. Vinrent enfin les expériences capitales de Newton sur l'analyse et la synthèse de la lumière, par lesquelles il fut prouvé qu'elle était composée de diverses sortes de lumières de différents degrés de réfrangibilité.

Jusqu'à cette démonstration de la composition de la lumière blanche, Newton avait été toujours et partout triomphant, triomphant dans les cieux, triomphant sur la terre, et son œuvre expérimentale subséquente a pour sa plus

grande partie une immortelle valeur; mais l'infaillibilité n'est pas un don fait à l'homme, et, après la découverte de la nature de la lumière blanche, Newton se montra lui-même humain. Il supposa que la réflexion et la dispersion allaient la main dans la main, et que l'on ne pouvait pas abolir ou annuler l'une sans annuler en même temps l'autre. Sur ce point, Dolland le corrigea; mais Newton avait commis une erreur plus grave que celle-ci. La science, comme j'ai cherché à vous le montrer clairement dans notre seconde Leçon, est seulement une partie du domaine de nos sens. Les racines des phénomènes sont enfoncées dans une région située au delà de la portée de nos sens; tant qu'il n'est pas descendu jusqu'à la racine, l'esprit de l'homme ne saurait être satisfait. Aussi trouvons-nous dans cette carrière optique les grands esprits qui ont toujours été impatients de rompre les limites des sens et de ramener les phénomènes à leurs fondements insensibles. Sous cette impulsion, ils entraient dans les régions des théories; et Newton, quoique attiré de temps en temps vers la vérité, fut plus fortement encore entraîné vers l'erreur, et en fit son choix définitif. Ses expériences sont impérissables; mais sa théorie a fait son temps. Pendant un siècle elle se tint debout comme une barrière opposée à toutes les découvertes; mais, comme toutes les barrières qui reposent sur l'autorité, et non sur la vérité, la pression alla grandissant sans cesse et finit enfin par renverser la barrière. Cette pression, comme vous le savez, fut due principalement aux travaux de Thomas Young et de son illustre collaborateur Fresnel.

En 1808, Malus, regardant à travers un spath d'Islande le Soleil réfléchi par une fenêtre du palais du Luxembourg à Paris, découvrit la polarisation de la lumière par réflexion. En 1811, Arago découvrit les splendides phénomènes

qui ont été mis en évidence dans la lumière réfractée par des plaques de gypse ; il découvrit aussi la rotation du plan de polarisation par les cristaux de quartz. En 1813, Seebeck découvrit la polarisation de la lumière par la tourmaline. La même année, Brewster découvrit les magnifiques bandes colorées qui entourent les axes des cristaux à deux axes. En 1814, Wollaston découvrit les anneaux du spath d'Islande. Tous ces phénomènes, qui, sans le guide de la théorie, auraient laissé l'esprit humain enfermé et perdu dans un labyrinthe de faits sans harmonie ni rapport mutuel, sont devenus un tout organisé par la théorie des ondulations.

Cette théorie fut appliquée et vérifiée dans toutes les directions. Airy se fit spécialement remarquer par la sévérité et la force concluante de ses preuves. La plus remarquable des démonstrations échut à sir William Hamilton, de Dublin, lequel, prenant la théorie là où l'avait laissée Fresnel, arriva à cette conclusion qu'en quatre points particuliers de la surface des ondes au sein des cristaux doublement réfringents le rayon ne doit pas se diviser en deux parties, mais en un nombre infiniment grand de parties, formant en ces points une enveloppe conique continue, au lieu d'une double image. Aucun œil humain n'avait encore vu cette enveloppe lorsque sir William Hamilton en affirma l'existence. Il pria le Dr Lloyd de mettre sa conclusion théorique à l'épreuve de l'expérience. M. Lloyd prit un cristal d'arragonite, et, suivant avec la plus scrupuleuse exactitude les indications de l'analyse mathématique, coupa le cristal là où la théorie disait qu'il devait être observé, et découvrit l'enveloppe lumineuse qui n'avait été d'abord qu'une pure conception de l'esprit du mathématicien.

Cependant, la grande théorie des ondulations, semblable à beaucoup d'autres vérités, que le long cours des âges a

prouvées être un bienfait pour l'humanité, eut à établir, par une lutte très-chaude, son droit à l'existence. De grands noms se sont rangés contre elle. Elle fut énoncée par Hooke, elle fut appliquée par Huyghens, elle fut défendue par Euler; mais l'autorité de ces savants illustres ne fit aucune impression. En effet, la théorie, dans leurs mains, était plutôt une analogie qu'une démonstration. Elle prit d'abord la forme d'une vérité démontrée entre les mains de Thomas Young. Il amena les ondes à se superposer les unes aux autres, il les força à se fortifier l'une l'autre ou à s'éteindre l'une l'autre à volonté. De leurs actions mutuelles il déduisit leurs longueurs et appliqua à tous les phénomènes les nombres ainsi déterminés. Il montra enfin que la difficulté, encore debout, de la polarisation pouvait être embrassée par la théorie.

Après lui vint Fresnel, que son habileté mathématique transcendante rendait capable de donner à la théorie la généralité que Young n'avait pu atteindre. Il saisit la théorie dans son intégralité, suivit l'éther dans le cœur des cristaux, à la structure la plus complexe, et dans les corps soumis à la traction ou à la compression. Il montra que les faits découverts par Malus, Arago, Brewster et Biot étaient, pour ainsi parler, autant de ganglions ou de centres nerveux d'un même organisme théorique, lui empruntant leur soutien et leur explication; mais son esprit était trop vigoureux pour le corps auquel il était associé; ce corps devint une ruine bien longtemps avant qu'il eût vieilli, et Fresnel mourut laissant cependant derrière lui un nom immortel dans les annales de la science.

Je veux dire un mot encore relativement à Fresnel. Il est des choses, Messieurs et Mesdames, qui sont meilleures que la science. Le caractère est au-dessus de l'intelligence;

mais il est particulièrement agréable, à ceux qui aiment à penser bien de la nature humaine, de voir combinés ensemble une intelligence élevée et un caractère éminemment droit. Cette combinaison existait certainement chez ce jeune Français. Dans ces chauds conflits de la théorie ondulatoire, il se conduisit en homme plein d'intégrité, ne réclamant rien de plus que son droit, et toujours prêt à céder leur droit aux autres. Il reconnaissait et proclamait hautement les mérites de Thomas Young. C'est Fresnel, en réalité, et son compatriote Arago qui réveillèrent en Angleterre la conscience de l'injustice faite à Young par la *Revue d'Édimbourg*.

J'aimerais à vous lire un court extrait d'une lettre écrite par Fresnel à Young, en 1824. Comme elle projette un jour aimable sur le caractère de ce savant français ! « Depuis longtemps, dit Fresnel, cette sensibilité et cette vanité que le peuple appelle l'amour de la gloire sont émoussées en moi. Je travaille beaucoup moins pour conquérir les suffrages du public que pour obtenir cette approbation intérieure qui a toujours été la plus douce récompense de mes efforts. Sans aucun doute, dans les moments de dégoût et de découragement, j'ai eu souvent besoin de l'aiguillon de l'ambition pour m'exciter à poursuivre mes recherches ; mais tous les compliments que j'ai reçus d'Arago, de Laplace et de Biot ne m'ont jamais donné autant de plaisir que la découverte d'une vérité théorique et la confirmation d'un calcul par l'expérience. »

Cela, Mesdames et Messieurs, est le dernier mot de la question en ce qui regarde la science. Elle doit être cultivée pour elle-même, pour le pur amour de la vérité, plutôt que pour les applaudissements et les profits qu'elle rapporte.

Et maintenant ma mission en Amérique touche heureusement à sa fin. Toujours je parlerai de l'esprit de tolérance avec lequel vous avez écouté mes quelques mots de conclusion en l'honneur des hommes qui nous ont légué le vaste ensemble de connaissances dont j'ai cherché à vous donner une idée dans ces Leçons. Quel était le motif qui les faisait agir ? Qui les pressait de livrer bataille à la Nature par trop rebelle et de remporter sur elle ces victoires qui sont devenues l'héritage de la race humaine ? Il ne faut jamais oublier que pas un de ces grands chercheurs, depuis Aristote jusqu'à Stokes et Kirchhoff, n'a eu en vue un but pratique, en donnant à ce mot *pratique* sa définition ordinaire. Ils ne se sont jamais proposé l'argent comme fin et la science comme moyen de l'acquérir. Le plus grand nombre d'entre eux ont agi tout à fait en sens contraire : ils faisaient de la science la fin et de l'argent qu'ils possédaient les moyens de la conquérir.

Nous pouvons voir aujourd'hui les résultats de leur travail sous mille formes pratiques, et cela suffit pour justifier, sinon ennoblir leurs efforts ; mais, je le répète, ils n'ont pas eu ces résultats en vue : leur récompense était d'une nature toute différente. De quelle manière différente ? Nous aimons les beaux vêtements, nous aimons le luxe, nous aimons les élégants équipages, nous aimons l'argent, et tout homme qui vise à ces choses comme au terme de ses efforts est fier des résultats devant le monde entier. En Amérique et en Angleterre, plus spécialement, c'est un *homme pratique ;* mais, j'en appelle avec confiance à toute cette assemblée, de semblables choses épuisent-elles les désirs de la nature humaine ? La seule présence, pendant ces six longues soirées d'hiver rigoureux, de ce vaste auditoire, qui témoigne de tant de force mentale et d'élévation d'esprit au sein de

cette grande cité, est une réponse éloquente à ma question. Je n'ai pas besoin d'apprendre à une assemblée comme celle-ci qu'il est des joies de l'intelligence comme il est des joies du corps, et que les plaisirs de l'esprit constituent la récompense de nos grands chercheurs. Ils poursuivent souvent leur route au doux murmure de la vérité naturelle, à travers la souffrance et l'abnégation. Quelques-uns d'entre eux, entraînés jusqu'à la mort par cette passion, lorsqu'ils ne pouvaient plus tenir une plume, dictaient à leurs amis les résultats de leurs travaux, puis ils se reposaient pour toujours.

Si nous avions pu voir ces hommes à l'œuvre, sans aucune conscience des résultats de leurs travaux, qu'aurions-nous pensé d'eux? Pour l'homme sans instruction de leur temps ils ressemblaient à de gros enfants jouant avec des bulles de savon ou d'autres bagatelles. Il en est encore de même aujourd'hui. S'il vous était donné de contempler un vrai chercheur, votre Henry ou votre Draper, par exemple, dans son laboratoire, à moins d'être animé de son esprit, vous ne comprendriez jamais ce qui le retient là. Beaucoup des objets qui captivent son attention vous apparaîtraient par trop vulgaires, et si vous veniez à lui demander à quoi peut servir son travail, il y a beaucoup à parier que vous le rendriez confus. Il serait incapable d'exprimer, dans des termes intelligibles pour vous, à quoi il peut servir. Il n'oserait pas vous assurer qu'il *puisse* mettre un seul dollar dans la poche d'une des créatures actuellement vivantes ou à venir. Une découverte scientifique *peut* non-seulement mettre des dollars dans la poche des individus, mais des millions dans les Trésors des nations, l'histoire de la science le prouve surabondamment; mais l'espérance d'en arriver là ne fut jamais, et ne pourra jamais être la force motrice du chercheur.

Je sais que je cours certains risques en parlant ainsi devant des hommes pratiques. Je sais ce que de Tocqueville a dit de vous : « L'homme du Nord n'a pas seulement l'expérience, il a la science. Cependant il n'a pas souci de la science comme plaisir et ne l'embrasse avec avidité que lorsqu'elle conduit à des applications utiles. » Mais je tiens à vous interroger à mon tour. Est-ce l'espérance d'applications utiles qui a fait que si souvent vous êtes venus remplir cet amphithéâtre, en dépit des rafales de neige et d'un froid si piquant? Je suis en droit de vous demander l'origine de cette amabilité qui m'a arraché à mes occupations de Londres, qui m'a fait vous parler ici, et qui, si je l'avais permis, m'aurait ramené chez moi millionnaire. Vous me la témoignez, non parce que ce soir je vous aurai appris à gagner par la science un seul centime, mais parce que j'ai essayé de mon mieux, avec toute l'habileté dont je suis capable, de présenter la science au monde comme un grand bien intellectuel. Jamais certainement deux expressions ne seraient plus détournées de leur sens et plus mal appliquées, alors qu'il s'agit de l'homme dans ses aspirations les plus hautes, que ces deux mots *utile* et *pratique,* comme les comprend le vulgaire; mais laissez-moi étendre assez leur définition pour qu'ils embrassent toutes les nécessités de l'homme, en y comprenant ses besoins intellectuels les plus élevés. C'est spécialement à ce point de vue de satisfaire aux besoins les plus élevés de l'intelligence, c'est parce que je la sais saine et bienfaisante, comme source à la fois de connaissances et comme moyen d'éducation, que j'appelle toute votre attention sur les droits de la science.

Même en ce qui concerne les nécessités et les joies matérielles, la science pure a certainement à dire son mot. Le peuple parle quelquefois comme si la chaleur n'avait pas été

étudiée avant sir James Watt, ou l'électricité avant Wheatstone et Morse ; tandis que Watt, Wheatstone et Morse, dans ce que leurs découvertes ont eu de pratique, étaient simplement les produits de forces antécédentes. Cette assertion, il me semble, mérite également un moment d'attention. Vous êtes ravis, et pour d'excellentes raisons, de vos télégraphes électriques ; vous êtes fiers de vos machines à vapeur et de vos usines ; vous êtes charmés des productions de la Photographie. Vous voyez chaque jour, avec une légitime fierté, la création de nouvelles formes d'industries, de nouveaux moyens d'ajouter à la richesse publique et au confort de la société. L'industrielle Angleterre est dans l'enfantement de forces tendant à ce but, et le pouls de l'industrie bat toujours plus fort au cœur des États-Unis ! Cependant, quand on les examine, que sont l'Angleterre et l'Amérique industrielles ?

Si vous voulez bien tolérer la liberté de mon langage, je vais répondre à cette question par un exemple. Mettez à nu un bras vigoureux et voyez se roidir ces muscles noueux, quand la main est fermée et le bras recourbé. Cette exhibition de l'énergie est-elle le travail du muscle seul ? En aucune manière. Le muscle est le canal de l'influence sans laquelle il serait aussi impuissant qu'une masse de pâte molle. C'est le nerf si délié et invisible qui développe l'énergie du muscle. Et sans les filaments du génie qui ont été lancés comme des nerfs à travers le corps de la société par les inventeurs originaux, l'Amérique et l'Angleterre industrielles seraient à un haut degré dans la condition de la pâte molle.

Au temps actuel, on appelle à grands cris, en Angleterre, l'*éducation technique* ou professionnelle, et cet appel est de nature à rallier la masse des intelligences, car la nécessité

de cet enseignement est évidente ; mais pourquoi n'appelle-t-on pas à plus grands cris encore les recherches originales de la science et des savants ? Sans celle-ci, cependant, aussi sûrement que le ruisseau se tarit quand la source meurt, l'*éducation technique* perdra toute sa vigueur de croissance, toute sa puissance de production. Nos grands chercheurs nous ont donné assez de travail pour un temps; mais, si leur esprit s'éteint, nous finirons par nous trouver éventuellement dans les conditions de ces Chinois dont parle de Tocqueville. Ayant oublié l'origine scientifique de ce qu'ils font, ils en sont réduits depuis des siècles à copier, sans variation, les inventions de leurs ancêtres qui, plus sages, avaient puisé directement leurs inspirations dans la Nature.

L'Angleterre et l'Amérique ont grand besoin d'avoir ces choses présentes à l'esprit; car l'abondance et la proximité des résultats matériels n'ont que trop de tendance à faire oublier à ces deux contrées les minces débuts intellectuels de ces richesses matérielles dans l'esprit du savant inventeur. Vous multipliez, mais il crée, et si vous le laissez mourir de faim, en d'autres termes si vous le tuez, c'est-à-dire si vous ne lui assurez pas la liberté de son but et les encouragements par lesquels seuls il peut l'atteindre, non-seulement vous perdez le pouvoir moteur du progrès intellectuel, mais infailliblement vous vous sevrez vous-mêmes des sources de la vie industrielle.

Ce que j'ai dit des opérations techniques, je pourrais le dire également du bienfait de l'éducation ; car, ici encore, le chercheur original est la source de toutes nos connaissances. Il appartient au professeur de donner à ces connaissances la forme requise ; c'est une tâche honorable et souvent difficile. C'est une tâche aussi qui reçoit sa consécration dernière lorsque le maître lui-même essaye honorablement

d'ajouter son résultat au grand fleuve des découvertes scientifiques. On pourrait, en effet, douter que la vie réelle de la science puisse être pleinement sentie et communiquée par un maître qui ne s'est pas mis lui-même en communion directe avec la Nature. Nous pouvons, il est vrai, recevoir de bonnes et instructives leçons des hommes habiles qui ont reçu de seconde main la totalité de leurs connaissances acquises, juste comme nous recevons des sermons bons et instructifs d'hommes intellectuellement capables, quoique sans grande science théologique ; mais pour ce pouvoir vivifiant de la science qui correspond à ce que les pères puritains appelleraient la *religion expérimentale du cœur,* il faut nécessairement remonter aux recherches originales.

Pour que la société soit, relativement à la science, dans une situation normale, trois classes de travailleurs sont nécessaires : d'abord les chercheurs de la vérité naturelle, dont la vocation est de poursuivre cette vérité pour elle-même et d'étendre le champ des découvertes sans aucune considération d'un but pratique ; secondement, le professeur de Philosophie naturelle, dont la vocation est de diffuser dans les masses les connaissances acquises par les inventeurs ; troisièmement, ceux qui appliquent la vérité naturelle et dont la vocation est de faire servir les connaissances scientifiques aux nécessités, au confortable et même au luxe de la vie. Ces trois classes doivent coexister et agir ensemble. Mais la notion populaire de la science, dans cette contrée comme en Angleterre, se rapporte moins à ce qu'on doit appeler proprement science qu'aux applications de la science.

Ces applications, spécialement sur le continent, sont si étonnantes, elles se répandent d'elles-mêmes si largement et sans causer d'ombrage, sous les yeux du public, qu'elles font perdre de vue les travailleurs engagés dans la pour-

suite, plus calme et plus profonde, des recherches originales.

Prenez le télégraphe électrique pour exemple, sur lequel, dans ces derniers temps, mon attention a été si souvent appelée. Je n'ai nullement la pensée d'atténuer dans le plus léger degré les services de ceux qui, en Angleterre et en Amérique, ont donné au télégraphe une forme si merveilleusement adaptée aux usages publics. Ils avaient droit à une grande récompense, et assurément ils l'ont reçue; mais je manquerais à la vérité envers vous et envers moi si j'omettais de vous dire que, quelque éclatants que soient leurs droits et leurs mérites, vos hommes pratiques n'auraient pas inventé le télégraphe électrique. La découverte de la télégraphie électrique suppose la découverte de l'électricité elle-même et le développement des phénomènes et des lois qui la régissent. De semblables découvertes ne peuvent pas être faites par des hommes pratiques, et elles n'ont jamais été faites par eux, parce que leurs esprits sont obsédés d'autres idées, qui, quoique d'une très-grande valeur à un point de vue donné, ne sont pas celles qui stimulent les inventeurs originaux.

Les anciens ont découvert l'électricité de l'ambre jaune, et Gilbert, dans l'année 1600, étendit cette découverte à d'autres corps. Vinrent ensuite d'autres chercheurs, et parmi eux votre propre Franklin; mais cette forme d'électricité, quoiqu'on l'ait essayée, n'aurait pas pu servir aux usages télégraphiques. Plus tard apparut le grand Italien Volta, qui découvrit la source de l'électricité qui porte son nom, et qui fit servir à son développement le jugement le plus profond et l'habileté expérimentale la plus grande. Plus tard encore vint l'homme qui joignit à la puissance de l'intelligence toutes les grâces du cœur humain,

Michel Faraday, qui a découvert la magnéto-électricité. Œrsted découvrit la déviation de l'aiguille magnétique. Arago et Sturgeon la magnétisation du fer par le courant électrique. Le circuit voltaïque, enfin, trouva son Newton ou son théoricien dans Ohm, tandis que Henry, de Princeton, qui a su reconnaître les mérites de Ohm, tandis qu'ils sont toujours décriés dans son propre pays, était aussi alors à l'avant-garde des recherches expérimentales.

Dans les ouvrages de ces hommes, vous trouvez tous les matériaux utilisés à cette heure dans toutes les formes du télégraphe électrique. En outre, Gauss, le célèbre astronome, et Weber, le célèbre physicien, tous deux professeurs à l'Université de Gœttingue, désirant établir un mode rapide de communication entre l'Observatoire et le cabinet de Physique de l'Université, le firent par le télégraphe électrique. Ainsi, avant que vos hommes pratiques fussent entrés sur la scène, la force avait été découverte, ses lois recherchées et rendues certaines; on était parvenu à se rendre absolument maître de tous les phénomènes de l'électricité; enfin son applicabilité à des buts télégraphiques avait été démontrée par des hommes qui ne demandaient pour récompense de leurs travaux que le sentiment d'une noble passion satisfaite et la joie qui accompagne la découverte de la vérité naturelle.

Ignorerions-nous toutes ces choses? Nous ne le ferions qu'à notre grand péril ; car, je le répète de nouveau, au delà de toutes vos applications pratiques il est une région de l'action intellectuelle dans laquelle les hommes pratiques ont rarement établi leur domaine, mais de laquelle ils tirent toutes leurs provisions. Séparez-les de cette région, et ils seront fatalement impuissants. Ce vieil adage : *Un autre homme a labouré, mais vous avez pris possession de son travail,* n'est nulle part plus naturellement vrai que quand

on l'applique au cas de celui qui découvre et de celui qui applique sa vérité naturelle. Quand je dis que les hommes pratiques ne sont pas ceux qui font les découvertes préliminaires, je ne prétends pas nier ces cas rares où celui qui a découvert sait comment donner à ses travaux une valeur pratique : je veux dire qu'en général des qualités différentes d'esprit et des habitudes différentes de la pensée distinguent celui qui découvre et celui qui applique; et, tandis que je m'efforce de faire valoir avec plus de solennité les droits de ceux dont la position, due au simple fait de leur élévation intellectuelle, est trop souvent incomprise, je ne prétends nullement exalter une classe de travailleurs aux dépens des autres : elles sont le complément nécessaire l'une de l'autre. Mais souvenez-vous qu'une des classes a la certitude qu'on prendra soin d'elle. Toutes les récompenses matérielles de la société sont déjà à sa portée, et, de plus, la société est par trop disposée à lui attribuer les faits intellectuels dont la découverte ne lui appartient pas. Or il ne peut en être ainsi qu'au détriment de ces études profondes d'où sont sortis, non-seulement nos connaissances de la Nature, mais nos arts industriels eux-mêmes, et par lesquelles le génie du pays va s'élevant incessamment.

M. Pasteur, un des hommes les plus éminents de l'Institut de France, dans le but d'expliquer la défaite désastreuse de sa Patrie et la victoire de l'Allemagne dans la dernière guerre, s'exprimait ainsi : « Peu de personnes comprennent l'origine réelle des merveilles de l'industrie et de la puissance des nations. Je n'en veux pas d'autre preuve que l'emploi de plus en plus fréquent dans le langage officiel et dans des écrits de toute sorte de cette expression erronée *science appliquée*. On déplorait naguère l'abandon des carrières scientifiques par des hommes capables de les suivre

avec distinction, devant un ministre du plus grand talent. Cet homme d'État essaya de montrer que ce résultat ne devait pas nous surprendre, puisque, *de nos jours, le règne de la science théorique a fait place à celui de la science appliquée*. Rien de plus erroné que cette opinion, rien, je n'hésite pas à le dire, de plus dangereux, même pour la vie pratique, que la conséquence qu'on pourrait tirer de ces paroles. Elles sont restées sur mon esprit une preuve de la nécessité impérieuse d'une réforme dans notre éducation supérieure. Il n'est pas de catégorie de la science à laquelle on puisse donner avec raison le nom de science appliquée. *Nous avons la science et les applications de la science,* qui sont unies ensemble comme l'arbre et son fruit. »

Cuvier, le créateur de l'Anatomie comparée, s'exprime ainsi sur ce même thème : « Ces grandes innovations pratiques sont la pure application des vérités d'ordre élevé qui n'ont pas été cherchées dans une intention pratique, mais qui ont été poursuivies pour elles-mêmes et par le seul amour de la science. Ceux qui les appliquent n'auraient pas pu les découvrir ; ceux qui les ont découvertes n'auraient aucune inclination à les conduire à une fin pratique. Engagés dans les hautes régions où leurs pensées les ont emportés, ils poursuivraient difficilement les résultats pratiques, quoique nés de leurs propres nécessités. Ces ateliers qui s'élèvent de toutes parts, ces colonies si peuplées, ces vaisseaux qui sillonnent les mers, cette abondance, ce luxe, ce tumulte, tout cela vient des inventeurs de la science, et cependant tout cela leur paraît étrange. »

Lorsque les pères pèlerins s'embarquèrent à Plymouth-Rock, et lorsque Penn fit son traité avec les Indiens, les nouveaux arrivants eurent à bâtir leurs maisons, à dompter la terre par la culture et à prendre soin de leurs âmes. Au

sein d'une semblable communauté, la science, dans ses formes les plus abstraites, il ne fallait pas y penser. Et à l'heure actuelle, alors que nos hardis pionniers de l'Ouest sont debout face à face avec une nature obstinée, percent les montagnes, subjuguent les forêts et les prairies, on ne peut plus s'attendre à la poursuite de la science pour elle-même. Les premières nécessités de l'homme sont la nourriture et l'abri ; mais une vaste portion de ce continent a déjà dépassé de beaucoup les limites du nécessaire. Les gentlemen de New-York, de Brooklyn, de Boston, de Philadelphie, de Baltimore et de Washington ont déjà bâti leurs maisons, et de très-belles maisons ; ils ont aussi assuré leurs dîners, à l'excellence desquels je puis rendre bon témoignage. Ils ont, de fait, atteint de telles conditions précises de bien-être et d'indépendance qu'on peut avec justice attendre de leurs mains la culture la plus élevée que l'humanité ait pu jusqu'ici atteindre. Ils sont arrivés à cet âge de la maturité, en tant que possesseurs de la richesse et des honneurs, où la recherche de la vérité naturelle, pour le propre amour de la vérité, doit trouver parmi eux des promoteurs et des protecteurs.

Parmi les divers problèmes qui se posent devant eux, ils ont celui-ci à résoudre : une République est-elle apte à enfanter les formes les plus élevées du génie ? Vous êtes familiers avec les écrits de de Tocqueville, et vous devez être au courant de la sympathie si intense qu'il ressent pour vos institutions. Sa sympathie est tout ce qu'il y a de plus autorisé, tant est grande la candeur philosophique avec laquelle il fait ressortir, non-seulement vos mérites, mais aussi vos défauts et vos dangers. Maintenant, si je viens à parler ici de science en Amérique dans un esprit critique et perfide, un rayonnement invisible de mes

paroles et de mes gestes vous fera découvrir exactement ma pensée et vous guidera dans le traitement que vous me ferez subir ce soir; mais si ce n'est pas dans un esprit hostile, si c'est, au contraire, dans un esprit inverse de l'esprit hostile, que je me hasarde à répéter devant vous ce que ce grand historien et analyste des institutions démocratiques dit de l'Amérique, je suis persuadé que vous m'écouterez favorablement jusqu'au bout. Il écrivait il y a vingt-trois ans, et peut-être n'écrirait-il pas de même aujourd'hui; mais il ne déplaira à personne qu'on fasse entendre de nouveau ses paroles, même, s'il est nécessaire, à l'oreille du cœur.

Dans un ouvrage publié en 1850, de Tocqueville dit: « Il faut reconnaître que parmi les peuples civilisés de nos jours, il en est peu chez lesquels les hautes sciences aient fait moins de progrès qu'aux États-Unis, ou qui aient fourni moins de grands artistes, de poëtes illustres et de célèbres écrivains » (*De la Démocratie en Amérique*, t. II, p. 36). Il exprime sa conviction que, si vous étiez seuls dans l'Univers, vous découvririez rapidement que vous ne pourriez pas faire longtemps des progrès dans la science pratique sans cultiver en même temps les sciences théoriques; mais, d'après de Tocqueville, vous n'êtes pas assez isolés pour cela. Il refuse de séparer l'Amérique de la patrie de ses ancêtres, et c'est là, ajoute-t-il, que vous puisez les trésors de l'intelligence, sans vous donner la peine de les créer.

De Tocqueville, évidemment, met en doute l'aptitude de la démocratie à alimenter le génie comme il s'alimente dans les anciennes aristocraties. « L'avenir, dit-il, prouvera si la passion pour les connaissances profondes, si rare et si féconde, peut naître et se développer aussi facilement dans les sociétés démocratiques que dans les sociétés aristocratiques. Quant à moi, continue-t-il, je n'ose pas

le croire. » Il parle de la fièvre inquiète des communautés démocratiques, non pas aux époques de grandes excitations, car ces époques peuvent imprimer aux idées un élan extraordinaire, mais aux époques de paix. Il y a alors, dit-il, « une agitation sourde qui constitue un véritable malaise, une sorte de conflit naissant de l'homme contre l'homme qui trouble et distrait l'esprit, sans donner à ses idées de l'élévation et de l'animation. » Il vous reste à prouver si ce sont là de tristes nécessités, ou si le génie scientifique à sa plus haute puissance peut trouver au milieu de vous un abri tranquille.

Je serais mal venu à contredire un observateur aussi fin et un écrivain politique aussi profond ; mais, depuis mon arrivée dans cette contrée, il m'a été impossible de découvrir dans la constitution de la société ce qui pourrait empêcher celui qui croirait avoir en lui les racines du savoir de se consacrer à la science pure avec un dévouement inébranlable. Si de grands résultats scientifiques n'ont pas encore été obtenus en Amérique, je serais disposé à l'attribuer, non aux petites agitations de la société, mais à ce fait que les hommes qui, parmi vous, possèdent toutes les qualités nécessaires à des recherches scientifiques profondes sont surchargés de devoirs d'administration ou de protection si lourds, qu'ils sont entièrement incompatibles avec cette méditation continue et tranquille qu'exigent les recherches originales. On peut demander à votre Henry s'il se serait laissé transformer en administrateur ; ou à votre Draper s'il se serait laissé condamner à abandonner la science pour écrire l'histoire, dans le cas où le chercheur original aurait été honoré comme il devrait l'être dans ce pays. J'ai peine à croire qu'ils y eussent consenti ; mais je ne puis pas m'imaginer que cet état de choses doive

durer longtemps. En Amérique, il y a une bonne volonté de la part des individus à mettre leur fortune, en matière d'éducation, au service de la République, que l'on ne trouverait probablement au même degré nulle part ailleurs, et cette bonne volonté n'a besoin que d'une direction sage pour vous mettre à même de vous justifier des reproches de de Tocqueville.

Votre problème le plus difficile est non pas de fonder des institutions, mais de découvrir des hommes. Vous pouvez ériger des laboratoires et les doter ; vous pouvez leur assurer toutes les ressources nécessaires aux recherches scientifiques; en agissant ainsi, vous ne faites que créer l'opportunité pour l'exercice d'une puissance qui doit venir d'une source bien au delà de votre portée. Vous ne pouvez pas créer le génie par l'acte de votre commandement. Dans le langage biblique, le génie est le don de Dieu, et le plus que vous puissiez faire, possédiez-vous toutes les richesses imaginables et votre bonne volonté pour les appliquer fût-elle un million de fois plus grande, est d'obtenir que cette glorieuse plante trouve autour d'elle la lumière et la chaleur nécessaires à son développement. Nous voyons, de temps en temps, un bel arbre jeté bas par les parasites qui l'ont envahi. Ces parasites, le jardinier peut les éloigner, quoique la force vitale de l'arbre lui-même soit bien au-dessus de ses efforts : de même, dans plusieurs cas, vos hommes riches peuvent défendre le génie des soins embarrassants auxquels les condamne la lutte pour l'existence.

Attiré par votre amabilité, je suis venu ici pour donner ces Leçons, et maintenant que ma visite en Amérique est devenue à peu près un événement passé, je la regarde en arrière comme un souvenir pur de toute tache. Aucun professeur n'a été récompensé comme je l'ai été. Placé sur

ce terrain avantageux, laissez-moi vous rappeler que la fonction de professeur n'est pas la fonction principale ou la plus élevée; que dans la science le professeur n'est habituellement que le distributeur de la richesse intellectuelle amassée par des hommes meilleurs. Et quoique enseigner et professer avec modération accroissent la santé morale, ce n'est pas seulement, ni principalement, comme professeurs, mais comme chercheurs que vos esprits les plus éminents doivent être utilisés. Vous avez parmi vous des génies scientifiques, non pas à la pelle, croyez-moi, il en est de même partout, mais rares et dispersés çà et là. Écartez de leur voie les empêchements qui ne sont pas inévitables. Regardez d'un œil sympathique les générateurs des connaissances nouvelles. Donnez-leur la liberté nécessaire pour leurs recherches, ne les surchargez pas des devoirs de la surveillance et de l'administration; ne leur demandez pas de prétendus résultats pratiques; évitez pardessus tout cette question que l'ignorance adresse si souvent au génie : « A quoi votre travail est-il utile? » Laissez-le faire de la vérité son but, quelque inutilisable que puisse être cette vérité au moment actuel. Si vous répandez ainsi votre semence sur les eaux, soyez sûrs qu'elle vous reviendra un jour centuplée peut-être, mais, hélas! après de longs jours.

# APPENDICE.

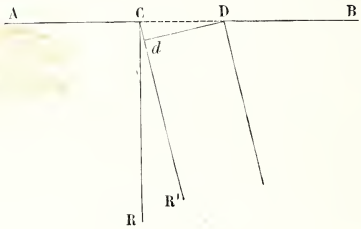
## MESURES DES ONDES DE LA LUMIÈRE.

Les franges de diffraction décrites dans la seconde Leçon, au lieu d'être formées sur la rétine, peuvent être formées sur un écran ou sur un verre dépoli, et l'on peut alors les regarder par derrière avec une lentille amplifiante; on peut même encore les observer dans l'air en retirant l'écran ou le verre dépoli. Au lieu de laisser les bandes se former sur la rétine, nous les supposerons donc formées sur un écran : cela nous mettra en position de comprendre, même sans le secours de la Trigonométrie, la solution de l'important problème de la mesure *des longueurs* d'ondes de la lumière.

Nous supposerons l'écran placé à une distance assez grande pour que les deux rayons partis des extrémités de la fente soient sensiblement parallèles. Nous avons appris dans la deuxième Leçon que la première des bandes sombres correspond à une différence de chemin marginal parcouru égale à une ondulation; la deuxième bande sombre à une différence de deux ondulations; la troisième bande sombre à une différence de trois ondulations. Cela posé, la distance angulaire de la bande au centre peut être très-exactement mesurée, cette distance dépendant, comme on l'a déjà dit, de la largeur de la fente. Avec une fente de $1^{mm},35$ de largeur, Schwerd a trouvé que la distance angulaire au centre de la première bande sombre était de $1'38''$, et que les distances angulaires de la deuxième, de la troisième, de la quatrième bande sombre étaient deux fois, trois fois, quatre fois cette quantité.

Soit AB (*fig.* 60) la plaque dans laquelle la fente est percée, et CD la largeur exagérée de cette fente, avec le faisceau de lumière rouge qui en sort sous l'obliquité correspondant à la première bande sombre. De l'un des bords D de la fente, faisons tomber une perpendiculaire sur le rayon qui rase l'autre bord en *d*. La distance C*d* entre le pied de cette perpendiculaire et l'autre bord est la longueur d'onde de la lumière. En outre, l'angle CD*d* égal à l'angle RCR′ est, dans le cas que nous considérons, égal à 1′ 38″. Du centre D, avec la largeur CD pour rayon, décrivons un demi-

Fig. 60.




cercle; son rayon DC étant de $1^{mm},35$, on trouve, par un calcul facile, pour longueur de ce demi-cercle $4^{mm},248$. La longueur C*d* est si petite qu'elle coïncide sensiblement avec l'arc du cercle. Par conséquent la longueur du demi-cercle est à la longueur C*d* de l'onde comme 180 degrés est à 1′ 38″, ou, réduisant le tout en secondes, comme 648000″ est à 98″. Nous avons donc la proportion 648000 : 98 :: 4,248 est à la longueur d'onde C*d*. En faisant le calcul, nous trouvons que la longueur d'onde pour cette sorte particulière de lumière est 0,000643 de millimètre, ou 0,000026 de pouce.

---

## EAU DE CRISTALLISATION.

La Lettre suivante de mon excellent ami M. le professeur Joseph Henry fait allusion à un cas surprenant de cristallisation repré-

senté au frontispice de cet Ouvrage, et dont je suis redevable à la bonté de M. le professeur Lockett.

« Institut Smithsonien de Washington, 24 mars 1872.

» Mon cher professeur Tyndall,

» Avec cette Lettre je vous envoie, à la demande de M. le professeur S.-H. Lockett, de l'Université du gouvernement de la Louisiane, une photographie dont voici l'explication :

» Dans mon salon se trouve un bassin rempli d'eau, dans lequel je lave les pinceaux de mes aquarelles. L'eau de lavage forme graduellement au fond du bassin une couche de sédiment uniforme, d'une couleur indéfinissable. Dans la nuit du 26 décembre dernier, qui fut extraordinairement froide pour nos climats, cette eau gela, et, lorsque le lendemain la glace se fut fondue, on vit apparaître sur le sédiment le beau dessin dont je vous envoie la photographie. Je décantai avec soin l'eau du bassin, je fis sécher le sédiment et je conservai ainsi parfaite cette figure naturelle. Elle a été photographiée avec le plus grand soin par un artiste de cette cité. On a gardé le négatif et, si vous exprimez le désir d'en avoir plusieurs exemplaires, on le reproduira facilement.

» Nous ne sommes guère familiarisés dans cette contrée chaude avec les belles *formes de l'eau :* celle-ci m'a semblé très-remarquable et très-digne d'être conservée.

» Le fait que ce résultat a été obtenu d'un sédiment coloré met sur la voie d'une méthode à suivre pour reproduire d'une manière intéressante les effets de la cristallisation.

» JOSEPH HENRY,
» Secrétaire de l'Institut Smithsonien. »

---

## VIE ET CRISTALLISATION.

Dans la troisième Leçon, j'ai décrit les phénomènes de la cristallisation, et indiqué leurs rapports avec les phénomènes de la vie.

Dans le discours inaugural de la Section de Mathématiques et Physique de l'Association Britannique réunie à Norwich, j'ai cherché à exprimer clairement les idées que je me formais alors sur ces questions; mais l'extrait suivant d'un journal écrit à Dinan, en 1855, me semble être un exemple intéressant du fait que les pensées que nous exprimons dans l'âge mur sont souvent celles qui nous ont préoccupés dans notre jeunesse.

« Sur un ou deux points d'où la vue était plus remarquablement belle, nous étendions le tapis sur l'herbe, et nous nous asseyions. H. souleva cette question : La beauté naturelle tend-elle à rendre l'homme meilleur? Et il invoqua l'exemple des tropiques à l'appui du fait que ce genre de beauté ne conduit pas toujours à la beauté de la vie. Je prétendis que, pour examiner l'effet de la beauté naturelle, il fallait la dégager de toute autre influence et étudier à part ses efforts. Si deux peuples de même caractère et de même capacité intellectuelle, en possession d'obtenir avec la même facilité les nécessités de la vie, sont placés l'un en face de scènes qui reflètent la beauté, l'autre en face de scènes qui respirent la tristesse et la terreur, le premier aura l'avantage. H. soutint que l'éducation était nécessaire pour que l'esprit pût profiter du bienfait d'une belle nature; je soutenais, au contraire, que l'éducation qu'il exigeait était l'effet naturel et nécessaire des beautés de la nature.

» L'influence du climat nous conduisit à considérer d'une manière générale l'influence du Soleil dans ses rapports avec le développement organique. Nous avions à notre portée un gros ormeau. Il avait fallu évidemment un travail mécanique pour élever la matière à une si grande hauteur, en opposition avec la force de la gravité. Les molécules ont monté contre ce pouvoir; sans être aidées par ce pouvoir, elles ont divergé pour former les branches, et se sont dispersées elles-mêmes dans un nombre incommensurable de feuilles. Cela posé, ces molécules ont été élevées ou par un pouvoir placé en dehors d'elles, ou par une puissance inhérente à elles. Aucun physicien ne pourrait accepter la première hypothèse:

il faut donc accepter la seconde. Considérons à ce point de vue l'expérience de cette année 1855. Pendant des semaines plus longues qu'à l'ordinaire, une basse température a empêché le monde végétal de donner aucun signe de vie; mais enfin le Soleil a pris de la force, la vie s'est par conséquent éveillée, et elle travaille encore à embellir ce qui nous entoure.

» Mais quelle est la chose qui ici a fait appel à la vie, et comment se fait-il que la lumière et la chaleur puissent l'affecter à ce point? La réponse à cette question exige que l'on ait d'abord répondu à cette autre : Que sont la lumière et la chaleur? A côté de l'ormeau se dresse un bouleau, avec ses feuilles tremblantes, agitées par la brise du matin. Il y avait là du mouvement, mais non pas le mouvement auquel nous donnons le nom de *vie :* chaque feuille dans ce cas se meut comme une masse, tandis que la vie exige un mouvement intérieur et individuel des molécules. Comment pourrons-nous nous le figurer? Supposons que les molécules sont douées de forces attractives et répulsives; supposons en outre qu'elles sont soustraites à l'action de la gravité et abandonnées à leurs propres actions mutuelles. Pour mieux fixer nos idées, supposons que la pointe de chaque feuille repousse les pointes de toutes les autres feuilles, et que la racine ou base de chaque feuille repousse les bases de toutes les autres. Un nombre de semblables feuilles prises ensemble et abandonnées à leurs actions mutuelles s'arrangeront d'une manière particulière, et prendront finalement une position dans laquelle les forces se feront équilibre. Lorsque les feuilles sont ainsi au repos, supposons que la brise qui en ce moment les fait trembler agisse sur elles et les dérange, ou vienne en un mot troubler l'équilibre préexistant. Il y aura de la part des feuilles un effort constant pour le rétablir, et en exerçant cet effort elles passeront par divers arrangements, la masse entière des feuilles prenant diverses formes dans le passage d'un arrangement à l'autre. Cette grossière image nous aidera à nous former une idée des procédés auxquels nous donnons le nom de *vie*.

» Les dernières particules ou molécules de matière sont douées de forces analogues à celles que nous venons d'attribuer aux feuilles; sous l'opération de ces forces, les molécules de la semence prennent des positions de repos, dans lesquelles elles resteraient pour toujours, si elles n'étaient pas troublées par des forces extérieures. Mais il est dans la lumière et la chaleur solaire une source de perturbations, qui nous arrivent sous forme d'ondulations à travers l'éther qui remplit l'espace. Ces vibrations tombant essentiellement sur les molécules de la semence placées en présence les unes des autres, les molécules et la matière environnante sont mises en mouvement; les actions mutuelles entrent en jeu; il s'exerce immédiatement un effort tendant à rétablir l'équilibre troublé; mais il est incessamment défait, et le résultat de ce conflit moléculaire est la formation de l'arbre. La vie est donc scientifiquement définie *un effort incessant pour rétablir l'équilibre troublé.*

» Ces spéculations ne naissent pas d'une curiosité profane; elles nous sont inévitablement imposées par notre esprit naturellement et profondément pensant. Laissons-nous aller à elle avec respect, mais avec courage; car, quoiqu'en agissant ainsi la pensée puisse faire évanouir plusieurs des idoles de notre jeunesse et ramener plusieurs mystères aux lois de la Mécanique, en définitive, les miracles de la nature n'en seront pas amoindris. Je le sais, il n'est pas d'issue possible pour des pensées analogues à celles-ci; à moins que nous n'assignions à chaque plante un architecte qui soulève les molécules et les mette en position, les propriétés physiques de la vie doivent être dues au travail des forces dont les molécules sont douées.

» Quel est l'architecte, dans le cas d'un cristal (des plumes, par exemple), de notre frontispice? Ou un architecte détaché a fait ce travail ou ces structures merveilleuses se sont érigées elles-mêmes, en vertu des forces qui leur sont inhérentes. En bâtissant un cristal, la nature exerce son premier effort comme architecte. Nous avons là le premier effort de ce qu'on appelle *force vitale;* mais les plus merveilleuses manifestations de cette force, quoique résultant de

procédés beaucoup plus complexes, sont, je le maintiens, de la même qualité que celle qui a pour terme la formation d'un cristal.

» Le poëte ou l'homme à imagination vive est-il condamné à se contenter de ces notions mécaniques et froides? Pourquoi le serait-il? car qu'avons-nous fait en repoussant un peu plus loin l'éternel mystère?

» Nous avons ramené la vie à l'opération des forces moléculaires ; mais d'où viennent les forces dont les molécules sont pourvues, et d'où viennent les molécules elles-mêmes? Qui ou quoi a donné à ces forces leurs tendances et leurs directions particulières? Contemplons le cycle des opérations par lesquelles la graine produit la plante, la plante produit la fleur, et la fleur produit de nouveau la graine, revenant ainsi à son point de départ avec la fidélité absolue de la planète dans son orbite. Tous ces procédés sont dus indubitablement à l'action de forces moléculaires; mais qui ou quoi a réglé le mode d'action de ces forces? Qui ou quoi a revêtu les molécules de la faculté de quitter, à un moment donné, une position déterminée, qui sera suivie d'une autre et d'une autre encore, à travers le cours des âges. Un certain papillon a sur son aile une tache orangée ; si nous ouvrons un livre écrit il y a cent ans et où ce papillon est figuré, nous retrouvons cette même tache sur son aile. Or cette tache dépend uniquement de la manière dont la lumière tombant sur l'aile et y pénétrant est renvoyée par elle; et cette manière, à son tour, dépend de la structure moléculaire de l'aile. Depuis un siècle, par conséquent, les molécules ont parcouru le même cycle successif. Les papillons ont été engendrés, ils ont crû, ils sont morts, et toujours nous trouvons leur architecture la même. Cela n'est-il pas étrange? Et comment l'expliquer? Nous pouvons assigner à ce fait un millier de raisons approchées, ou d'à peu près; mais, au fond, nous n'en avons pas l'explication. Et cependant nous gardons ferme notre position première. Il n'est rien dans l'architecture de cette aile qui ne puisse trouver son Newton prêt à démontrer que la loi et les principes mis en jeu dans sa construction sont qualitativement les mêmes que ceux mis en jeu dans la

construction du système solaire. Il n'y a pas de distinction essentielle entre l'organique et l'inorganique; les forces présentes dans l'un, si on les compose convenablement, peuvent et doivent produire les phénomènes de l'autre.

» Je vais jusque-là avec une confiance absolue : je suis même prêt à faire encore un pas plus avant. Le cerveau de l'homme lui-même est assurément un assemblage de molécules arrangées suivant des lois physiques; mais, si vous me demandez de déduire de cet assemblage le plus petit des phénomènes de la sensation ou de la pensée, je me prosterne dans la poussière, et je reconnais l'impuissance humaine. Cette fois la spéculation étendrait ses actes bien au delà de la région où il n'est plus de milieu capable de soutenir son vol. »

---

## SUR LES SPECTRES DE LA LUMIÈRE POLARISÉE.

M. William Spottiswoode a récemment fait, en présence des membres de l'Institution royale, sous une forme vraiment frappante, une série d'expériences sur les spectres de la lumière polarisée. Avec ses grands prismes de Nicol, il a d'abord, le premier, répété et expliqué les expériences de MM. Foucault et Fizeau, et plus tard il a enrichi ce chapitre de l'Optique d'additions très-belles qui lui sont propres. J'ajoute ici un résumé de sa dissertation :

C'est un fait bien connu que si l'on place entre les deux prismes de Nicol, ou, pour parler plus techniquement, entre le polariseur et l'analyseur, une plaque de sélénite suffisamment mince, il se produit une couleur vive. Et l'on se pose naturellement cette question : quelle est la nature de cette couleur? est-elle simplement une couleur pure du spectre, ou est-elle composée? Si elle est composée, quelles sont ses parties constituantes? La réponse donnée par la théorie des ondulations est en abrégé celle-ci : dans leur passage à travers les plaques de sélénite, les rayons ont été telle-

ment séparés suivant la direction de leurs vibrations et la vitesse de leur transmission, que si l'on vient à les recomposer au moyen de l'analyseur, ils se neutraliseront quelquefois l'un l'autre. S'il en est ainsi, cette décomposition sera rendue visible quand le faisceau émergent de l'analyseur aura été dispersé par le prisme ; car, comme nous avons alors les rayons de toutes les couleurs différentes rangés l'un à côté de l'autre, s'il en manque quelques-uns, leur absence se manifestera par l'apparition d'une bande sombre qui prendra leur place dans le spectre. Il n'en sera pas seulement ainsi : le spectre devra en outre mettre en évidence les autres phénomènes manifestés par la sélénite, lorsqu'on fait tourner l'analyseur, c'est-à-dire que, lorsque l'angle de rotation aura atteint 45 degrés, toute trace de lumière devra avoir disparu, et que, quand l'angle de rotation aura atteint 90 degrés, la couleur devra reparaître, non pas cependant avec sa teinte primitive, mais avec la teinte complémentaire.

Vous voyez, dans le spectre de la lumière rougeâtre produite par la sélénite, une bande large et sombre au sein du bleu; lorsque je fais tourner l'analyseur la bande devient de moins en moins sombre, et quand l'angle de rotation a atteint 45 degrés elle disparaît entièrement. A ce moment, chaque partie du spectre a son intensité proportionnelle, et l'ensemble produit l'image uniforme que l'on voyait sans le spectroscope. Enfin, à mesure que l'on continue de faire tourner l'analyseur, une bande sombre apparaît dans le rouge, au sein de la portion du spectre complémentaire de celle occupée par la première bande sombre ; l'obscurité est le plus grande lorsque la rotation est de 90 degrés. Le spectroscope nous donne ainsi la raison complète de ce qui a eu lieu dans la production de la couleur primitive et de ses variations.

Il est, en outre, bien connu que la couleur produite par une sélénite ou par une plaque d'un autre cristal dépend de l'épaisseur de cette plaque. Et, de fait, si l'on prend une série de plaques donnant différentes couleurs, on trouve que leurs spectres sont sillonnés de bandes différemment distribuées. Les plaques plus

minces donnent des bandes situées dans les parties du spectre qui sont près du violet, où les longueurs d'ondes sont plus courtes et, par conséquent, font naître des couleurs plus rouges; tandis que les plaques plus épaisses se couvrent de bandes situées plus près du rouge, où les ondes sont plus longues et, par conséquent, engendrent des couleurs plus bleues.

Lorsque l'on fait croître d'une manière continue l'épaisseur de la plaque, de telle sorte que la couleur produite ait parcouru toute l'étendue du spectre, un accroissement subséquent d'épaisseur reproduit les couleurs dans le même ordre que primitivement; mais on remarquera qu'à chaque retour du cycle entier des couleurs les teintes deviennent de plus en plus pâles, jusqu'à ce qu'après avoir parcouru un certain nombre de cycles, et l'épaisseur de la plaque étant devenue considérable, toute trace de couleur aura disparu. Prenons une série de plaques dont les deux premières, comme vous le voyez, donnent des couleurs, tandis qu'avec les autres qui sont d'épaisseur successivement plus grande, les teintes sont si faibles qu'on peut à peine les distinguer. Le spectre de la première montre une simple bande; celui de la seconde en montre deux. On voit, en outre, que la seconde série de teintes n'est pas identique avec la première, mais qu'elle est produite par l'extinction de deux des couleurs composantes de la lumière rouge. Les spectres des autres plaques montrent des séries de bandes de plus en plus nombreuses, en proportion de l'épaisseur de la plaque, et forment une série que l'on peut faire croître indéfiniment. Donc la lumière totale dont le spectre est dépouillé par les plaques plus épaisses est prise d'un grand nombre de ses régions; ou, en d'autres termes, la lumière qui persiste est distribuée de plus en plus uniformément sur le spectre, et la somme totale de ses rayons approche de plus en plus près de la lumière blanche.

Ces expériences ont été faites, il y a plus de trente ans, par deux physiciens français : MM. Foucault et Fizeau. Si, au lieu de sélénite, de spath d'Islande ou d'autres cristaux ordinaires, on fait usage de quartz taillé perpendiculairement à l'axe, et qu'on

fasse tourner l'analyseur comme auparavant, la lumière, au lieu de montrer une seule couleur et sa complémentaire avec une phase intermédiaire à laquelle correspond l'absence de toute couleur, change continuellement de teinte, et l'ordre des couleurs dépend en partie du sens dans lequel on fait tourner l'analyseur, en partie du caractère du cristal, c'est-à-dire suivant qu'il est dextrogyre ou lévogyre. Si nous examinons le spectre dans ce cas, nous trouvons que la bande sombre ne disparaît jamais, mais qu'elle marche d'une extrémité du spectre à l'autre, ou inversement, dans la direction qui donne les teintes vues par projection directe.

Le mode de polarisation produite par la plaque de quartz s'appelle *circulaire,* tandis que celle qui est produite par les autres sortes de cristaux est appelée *plane,* eu égard à la forme des vibrations exécutées par les molécules de l'éther. Et ceci nous conduit à examiner d'un peu plus près la nature de la polarisation des différentes régions de ces spectres de lumière polarisée.

Cela posé, deux choses sont claires : 1° que si la lumière est polarisée rectilignement, c'est-à-dire que si les vibrations, sur le rayon tout entier, sont rectilignes, et dans un même plan, elles doivent, dans toute leur manière de se comporter, être en rapport avec une certaine direction dans l'espace, de telle sorte qu'elles soient différemment affectées par les différentes positions de l'analyseur ; 2° que si les vibrations sont circulaires, elles seront affectées de la même manière précisément (quelle que soit d'ailleurs cette manière) dans toutes les positions de l'analyseur. Cette affirmation n'est en réalité que la récapitulation du point essentiel de la polarisation. De fait, la lumière rectilignement polarisée est transmise et éteinte par l'analyseur, quand on le fait tourner de 90 degrés, tandis que la lumière circulairement polarisée (si l'on pouvait la réduire à un seul rayon) demeure en apparence non changée. Et si nous examinons avec soin le spectre de la lumière qui a passé à travers la sélénite ou un autre cristal ordinaire, nous devrons constater que, en commençant par deux bandes qui se suivent en position, les parties occupées par ces bandes et celles

qui se montrent au point milieu de leur distance sont rectilignement polarisées, car elles deviennent alternativement brillantes et sombres, tandis que les parties intermédiaires, c'est-à-dire les parties situées au quart de la distance d'une bande à la suivante, restent brillantes d'une manière permanente. Elles sont de fait circulairement polarisées; mais il serait incorrect de conclure de cette seule expérience que c'est réellement ce qui a lieu, car les apparences seraient les mêmes si ces parties étaient non polarisées ou dans la condition de lumière ordinaire. Et dans de semblables conditions nous devons conclure avec une égale justice que les portions situées des deux côtés de celles que nous venons de mentionner (par exemple, les parties situées au huitième de l'intervalle entre les bandes) sont partiellement polarisées. Or voici un instrument de construction très-simple, appelé *plaque quart d'onde*, plaque ordinairement de mica, qui nous mettra à même de distinguer entre la lumière non polarisée et la lumière circulairement polarisée. L'effet mécanique exact produit sur le rayon par cette plaque ne pourrait que très-difficilement être expliqué en détail, dans les limites du temps dont nous pouvons disposer; mais il suffit pour le présent de dire que, placée dans une position convenable, la plaque quart d'onde transforme la polarisation plane en polarisation circulaire, et la polarisation circulaire en polarisation plane. Cela étant ainsi, les parties qui primitivement étaient sillonnées de bandes doivent rester brillantes, et celles qui primitivement étaient brillantes doivent se sillonner de bandes pendant la rotation de l'analyseur. L'effet général pour l'œil sera donc de déplacer les bandes d'un huitième de l'intervalle qui sépare chaque paire de bandes.

La polarisation circulaire, semblable au mouvement circulaire en général, peut naturellement être de deux sortes, qui diffèrent seulement par la direction du mouvement. Et de fait, pour convertir la polarisation circulaire produite par une de ces plaques d'une de ces sortes dans l'autre (de dextrogyre en lévogyre et *vice versâ*), nous avons seulement à faire tourner la plaque sur elle-

même de 90 degrés. Réciproquement, la polarisation circulaire dextrogyre sera changée par la plaque en polarisation plane dans une direction, tandis que la polarisation lévogyre sera changée en polarisation plane dans une direction à angle droit avec la première, d'où nous concluons que, si l'on fait tourner la plaque, nous devons constater que les bandes sont déplacées dans une direction opposée à celle dans laquelle elles étaient d'abord déplacées. Nous savons par conséquent ainsi immédiatement, non-seulement que de chaque côté d'une bande la polarisation est circulaire, mais aussi immédiatement que de l'autre côté elle est lévgoyre (1).

Si le temps le permettait, j'entrerais dans de plus grands détails et je vous montrerais qu'entre la polarisation rectiligne et la polarisation circulaire la polarisation est elliptique; j'indiquerais même, dans tous les cas, la position du grand et du petit axe de l'ellipse avec la direction du mouvement.

Avant de passer aux formes plus variées des bandes spectrales, que j'espère pouvoir reproduire sous vos yeux, j'aimerais mieux appeler votre attention pendant quelques minutes sur les phénomènes particuliers qui se présentent quand on fait usage à la fois de deux plaques de sélénite de couleurs complémentaires. L'aspect du spectre varie avec la position relative des deux plaques. Si elles sont placées symétriquement, c'est-à-dire comme si elles ne formaient qu'une même plaque, elles se comporteraient comme une seule plaque dont l'épaisseur serait la somme des épaisseurs de chacune, et elles produiraient un nombre de bandes double de celui que donne chaque plaque séparée; puis, lorsqu'on ferait tourner l'analyseur, les bandes disparaîtraient et reparaî-

---

(1) En ces points les deux vibrations rectangulaires dans lesquelles le rayon polarisé primitif est décomposé par les plaques de sélénite agissent l'une sur l'autre comme les impulsions rectangulaires imprimées à notre pendule de la quatrième Leçon, l'une de ces impulsions étant donnée au pendule quand il est à la limite de son oscillation. La vibration est ainsi convertie en rotation.

traient dans les positions complémentaires, comme cela a lieu dans le cas de la polarisation plane. Si l'une d'elles est tournée de 45 degrés, on ne verra plus qu'une seule bande dans une position particulière du spectre. Cette bande se divise en deux qui s'éloignent l'une de l'autre vers les extrémités rouge et violette du spectre respectivement, ou s'avancent l'une vers l'autre, suivant la direction dans laquelle on fait tourner l'analyseur. Si l'on fait tourner la plaque de 45 degrés dans un sens opposé, les effets sont inverses. L'obscurité des bandes n'est cependant pas aussi complète durant leur passage entier. Enfin, si une des plaques est tournée de 90 degrés, on ne verra plus de bandes et le spectre sera alternativement brillant et sombre, comme si l'on ne se servait pas de plaques, avec cette seule exception que le plan de polarisation a lui même tourné de 90 degrés.

Si l'on se sert d'un cristal taillé en forme de coin, les bandes, au lieu d'être droites, croiseront le spectre diagonalement, la direction de la diagonale (à droite ou à gauche) étant déterminée par la position du bord le plus épais de la plaque. Si l'on se sert de deux plaques en coin semblables, avec leurs bords épais en contact, elles se comporteront comme un coin dont l'angle et l'épaisseur seraient doubles de ce qu'ils sont pour l'un d'eux; si elles sont placées dans une position renversée, elles agiront comme une plaque plate, et les bandes sillonneront de nouveau le spectre dans une direction transversale à angle droit avec sa longueur.

Si l'on se sert d'une plaque concave, les bandes se disposeront elles-mêmes sous forme d'éventail, leur divergence dépendant de la distance du centre de la concavité à la fente.

Si l'on se sert de deux quartz en forme de coin, dont l'un a son axe optique parallèle au bord de l'angle réfringent et l'autre son axe perpendiculaire à ce bord, mais dans un des plans contenant cet angle (compensateur de Babinet), les apparences des bandes sont très-variées.

Les bandes diagonales, outre qu'elles se doublent quelquefois comme avec les coins ordinaires, se combinent quelquefois

aussi de manière à former des bandes longitudinales, au lieu de bandes transversales, et quelquefois se croisent les unes les autres, de manière à former des patrons diaprés avec des compartiments brillants sur une charpente sombre, et *vice versâ*, suivant la position de la plaque.

Les effets des dispositions différentes des cristaux interposés peuvent être variés à l'infini; mais j'en ai peut-être assez dit pour montrer la délicatesse de la méthode d'analyse spectrale appliquée à la lumière polarisée.

Le bel et singulier effet obtenu avec une plaque circulaire de sélénite, mince au centre, et augmentant graduellement d'épaisseur vers la circonférence, se rattache exactement à un effet semblable obtenu avec les anneaux de Newton. Que par une fente mince on fasse tomber un rayon de lumière sur l'ensemble des verres qui montrent les anneaux de Newton, de manière à couvrir une zone verticale étroite qui traverse tous les anneaux, l'image de cette zone projetée sur l'écran est croisée par des portions des anneaux colorés. Si l'on soumet le faisceau réfléchi à l'analyse prismatique, le spectre résultant pourra être considéré comme formé d'un nombre indéfini d'images des zones ainsi juxtaposées. Dans l'image, avant la dispersion, nous avons les anneaux colorés : l'extinction de la lumière n'est nulle part complète; mais, lorsque les différentes couleurs ont été séparées par la dispersion, chaque couleur est sillonnée transversalement par son système de bandes d'interférences sombres, qui deviennent de plus en plus serrées, à mesure que la réfrangibilité de la lumière augmente. Le spectre complet, par conséquent, apparaît sillonné d'un système de bandes sombres croisant les couleurs transversalement, et se rapprochant les unes des autres en passant du rouge au bleu.

Dans le cas de la plaque de sélénite, on place une fente en avant du polariseur, et la plaque de sélénite est tenue près de la fente, de telle sorte que la lumière passe à travers la zone centrale de la couche, comme, dans le cas des anneaux de Newton, l'image de la zone est croisée par des bandes colorées; mais, lorsqu'elle est soumise à l'analyse prismatique, la lumière de la zone fournit un spectre sillonné de bandes d'une obscurité complète, exactement comme dans le cas des anneaux de Newton et pour une raison semblable. C'est le brillant effet décrit par M. Spottiswoode, comme arrangement en éventail des bandes, l'éventail s'ouvrant à l'extrémité rouge du spectre.

# TABLE ALPHABÉTIQUE.

## A

Aberration de la lumière, 24.
— de sphéricité, 9.
Absorption par les flammes, 211; principes de l', 212.
— de la lumière par les corps, 36.
— et mécanisme moléculaire, 41.
Accès (leur théorie), 83.
— leur explication par les anneaux de Newton, 84.
— Réfutation de cette théorie, 86.
Achromatisme de l'œil imparfait, 9.
— comment masqué, 31.
Acide tartrique, sa cristallisation régulière et ses effets, 144.
Action chimique de la lumière, 174.
Acland, 14.
Airy (sir George), rigueur et exactitude de ses conclusions, 222.
Alhazen, ses recherches relatives à la lumière, 14, 220.
Alun perméable à la lumière, imperméable à la chaleur, 186.
Analyse spectrale, principes, 201.
Analyseur et polariseur, 142.
— recomposition de deux systèmes d'ondes, par l', 140.
Angle limite de la réflexion, 21.
— de polarisation, 125.
Angström, son Mémoire sur l'analyse spectrale, 215.
Anneaux de Newton, 80.
Arago (François) rétablit Young dans ses droits, 55.
— ses découvertes relatives à la lumière, 222.
— Électro-aimant, 232.
Arc-en-ciel, explication qu'en donne Descartes, 27.
— électrique, sa chaleur, 180.
Argent, analyse de son spectre, 202.
Aristote, son propagé par l'air, 56.
Arrangement des cristaux, 120, 136.
Axe des cristaux, 120, 130.
— anneaux qui les entourent, 130; multiples, 156, 158.

## B

Bacon (Roger), ses recherches sur la lumière, 220.
Balfour-Stewart, couleur noire et incandescence, 201.
Barreau aimanté; origine de l'idée d'attraction, 102.
— ses pôles, 103.
Bartholin (Érasme), sur le spath d'Islande, 122.
Battement des sons, 66.
Bence (Jones), fluorescence, 177.
Bernard (président), son Essai sur la théorie ondulatoire, 161.
Bérard, sur la polarisation de la chaleur, 193.
Biot, sa célèbre expérience des vibrations mises en évidence par la polarisation de la lumière, 150.
Bleu du ciel, sa cause, 162.
Boyle (Robert), ses observations sur les couleurs, 72, 74.
— ses remarques sur la fluorescence, 177.
— *Lignum nephreticum*, sa fluorescence, 178.
Bradley (James) prend part aux observations et aux raisonnements de Roemer, 23.
— découvre l'aberration de la lumière, 23, 24.
Brewster (sir David), sa principale objection contre la théorie ondulatoire de la lumière, 52.

— sur la fluorescence, 179.
— sa découverte des cristaux à deux axes, 158.
Brougham (plus tard lord) ridiculise les idées théoriques de Thomas Young, 55.
Browning (Mr), ses prismes, 135.
— son spectroscope, 136.
Bulles de savon et leurs couleurs, 72.
Bunsen, découverte de l'analyse spectrale, 204.

## C

Cœsium, sa découverte, 205.
Calorescence, 187.
Carbone, raies de sa vapeur, 202.
César (Jules), son propos relativement aux sources du Nil, 101.
Chaleur, sa génération, 6.
— objet des recherches de M. Draper, 174, 185.
— découverte de la chaleur obscure des rayons solaires, 175.
— rayonnante, 188.
— évaluation de la chaleur rayonnante, 184.
— diathermancie ou perméabilité à la chaleur rayonnante, 186.
— conversion des rayons de chaleur en rayons de lumière, 187.
— formation des images de chaleur invisibles, 193.
— réflexion, 192.
— réfraction, 193.
— polarisation et dépolarisation de la, 193.
— double réfraction de, 196.
— magnétisation de, 196.
Chercheur et professeur, 220.
Chlorhydrate d'ammoniaque, sa cristallisation, 110.
Combustion, sa définition, 6.
Comète, évaluation de la température par Newton, 183.
Constitution de la lumière blanche, 32.
Corps, action sur la lumière élective et créatrice, 33.
— agissant par procédé négatif, 34.
Couleurs des feuilles, 40.
— des plaques minces, 71.
— observation de Boyle sur les, 72, 73.
— toujours mélangées, 81.
— comment Newton les a expliquées, 87.
— complémentaires, 32.
— observation de Hookes sur les couleurs des plaques minces, 72, 75.
— des surfaces striées, 99, 159.
Courant électrique, 7.
Crookes, découverte du thallium, 205.
Cristaux, leur action sur la lumière, 107.
— édifiés par la force polaire, 108.
— leur structure considérée comme une introduction à leur action sur la lumière, 109.
— action de la cristallisation sur les phénomènes optiques, 117.
— anneaux qui entourent leurs axes, 157.
— uniaxes et biaxes, 158.
— leurs phénomènes et la relation de ces phénomènes avec la vie, 245.
Cristallisation de l'eau, 114.
Cuvier, nécessité de la science pure, 234.

## D

Darwin, ses spéculations, 95.
Davy (sir Humphry), sa réputation, 55.
Décomposition de la lumière qui tombe sur les corps, 38.
Dédain de la science chez les anciens, 14.
Desains, polarisation de la chaleur, 198.
De Tocqueville, ses écrits, 229.
Démocratie, ce qu'en dit de Tocqueville, 235.
Dépolarisation, 131.
Descartes, son explication de l'arc-en-ciel, 27.
— ses idées sur la transmission de la lumière, 27.
— ses notions sur la lumière, 47.
Diamant, sa combustion dans l'oxygène, 180.
Diathermancie, 186.
Diffraction de la lumière, ses phénomènes, 87.
— bandes, 88.
— son explication, 90.
— couleurs produites par la, 96, 98.
Dilatation de l'eau par la cristallisation, 114.
Dispersion de la lumière, 29.
— abolie sans que la réfraction cesse, 30.
— différente pour les différents corps, 31.

— des ondes de l'éther par les particules atmosphériques, 163.
Dollond, expériences sur l'achromatisme, 29.
Draper (Dr), 71; ses recherches sur la chaleur, 174, 185.
— science pure, 237.
Drummond, lumière qui porte son nom, 207.
Dualité de côtés du rayon polarisé, 122.
Eau, absorbe la lumière; noire, si elle est profonde, 37.
— pourquoi vire au bleu, 38.
— se contracte et se dilate par le froid, 114.
— — comment, 116.

## E

Écorce de marronnier, sa fluorescence, 179.
Éducation technique, 228.
Électricité, découvertes dans son domaine, 231.
Émerson, 53.
— les ondes de l'air, 59.
Émission, théorie de l', ses bases, 49.
— — épousée par Newton, et ses résultats, 85.
Éther, son existence soutenue par Huyghens et Euler, 52.
— repoussée par Newton, 52.
— son idée cependant familière à Newton, 87.
Eusèbe et les physiciens de son temps, 14.
Expansion par le froid, 114.
Expérience, à quoi elle sert, 83.

## F

Faisceaux et rayons lumineux, 9.
Faraday, sa réputation, 55.
— sa découverte de la magnéto-électricité, 232.
Fentes, origines de la diffraction, 88.
Filtre des rayons, 188.
Fin et moyens, 189.
Fizeau détermine la vitesse de la lumière, 241.
Firmaments artificiels, 105.
Fluorescence, sa découverte par Stokes, 176.
— son nom, 187; entrevu par Boyle, 177.
Forbes (professeur), polarise et dépolarise la chaleur, 193.
Formes (les) de l'eau, 115.
Foucault détermine la vitesse de la lumière, 24.
— ses expériences sur les rayons du Soleil, 210.
— devance Kirchhoff dans la signification des raies, 210.
Franges de diffraction, 159.
— colorées des lames minces, 73.
Fraunhofer, ses calculs théoriques sur la diffraction, 97.
— ses raies, 200.
— leur explication, par Kirchhoff, 208.
Fresnel rétablit Young dans ses droits, 55.
— ses calculs théoriques sur la diffraction, 97.
— sa capacité mathématique, 223.
— son nom immortel, 224.
— sa lettre à Young, 224.

## G

Gauss, instrument avec lequel il met en évidence les plus petites variations du magnétisme terrestre, 179.
Génie, don de Dieu, doit être encouragé, 239.
Gilbert, électricité, 231.
Glace, ses cristaux, 113.
— ses fleurs, 114.
— plus légère que l'eau, 115.
Gloire solaire, 216.
Gœthe, fluorescence, 179.
Grandeur angulaire constante dans chaque cristal, 112.
Gravitation, origine de la notion de l'attraction, 102.
— valeur de la théorie de la, 161.
Grimaldi, ses découvertes relatives à la lumière, 61.
— Généralisation de ses idées par Young, 62.

## H

Hamilton (sir William), services rendus par lui à la science de l'Optique, 222.
Helmholtz, son expérience sur l'électricité animale, 13, 14.
— son estime du génie de Young, 54.
— sur l'achromatisme imparfait de l'œil, 9.
— révèle la cause du vert dans le cas des pigments, 39.

Henry (professeur Joseph), son invitation, 3.
— sur la cristallisation de l'eau, 243.
— Hommage rendu à M. Tyndall, 219.
Herschel (sir John), ses calculs théoriques sur la diffraction, 97.
— observe et décrit le premier la fluorescence du sulfate de quinine, 179.
— ses expériences sur le spectre, 214.
— sa science pure, 237.
Herschel (sir William), ses expériences sur la chaleur des diverses couleurs du spectre, 210.
Hookes (Robert), sur la propagation instantanée de la lumière, 148.
— sur les couleurs des plaques minces, 72, 75.
— ses remarques sur l'idée que la lumière et la chaleur sont des modes de mouvement, 77.
Huyghens, analyse spectrale, 218.
Huyghens (Dr) défend la conception de l'éther, 52.
— son principe célèbre, 52, 53.
— sur la double réfraction du spath d'Islande, 122.

## I

Identité substantielle de la lumière et de la chaleur rayonnantes, 190.
Imagination, sa valeur, 46.
— note de Maclaurin à ce sujet, 47.
Impureté des couleurs naturelles, 39.
Indice de réfraction, 17.
Interférences des ondes du son, 66.
— conditions d'interférence des rayons lumineux, 70.
— causes des couleurs d'absorption, 71.
— des ondes de la lumière, 25.

## J

Janssen, sur les protubérances rouges solaires, 217.
Jupiter, observations de Roemer sur les satellites, 21.
— sa distance au Soleil, 21.

## K

Kepler, sa manière de procéder, 95.
— ses lois célèbres, 15.
— échoue par rapport à la réfraction de la lumière, 16.
— ses recherches sur la lumière, 220.
Kirchhoff, professeur, découverte de l'analyse spectrale, 204.
— son explication des raies de Fraunhofer, 206.
— ses précurseurs, 214.
— son œuvre scientifique et ses droits à l'immortalité, 216.
Knoblauch, sa démonstration de la double réfraction de la lumière par le spath d'Islande, 198.

## L

Lactance, sur les physiciens de son temps, 14.
*Lames* minces, 135.
— de mica, 76.
— de sélénite, 130.
— en coin, 143.
Lamy obtient le thallium en lingots, 205.
Lanterne pour la lumière électrique, 160.
Lentille de glace, combustion à travers une, 81.
Lesley, professeur, son invitation, 3.
Lignes de force, 107.
Lloyd (Dr), polarisation de la chaleur, 181.
— — sur la réfraction conique de la lumière, 210.
Lockyer, sur les protubérances rouges du Soleil, 217.
Longueurs d'onde, 52.
— des rayons lumineux, 68.
— gouvernent toute la théorie de la lumière, 160.
Lucrèce, théorie atomique, 101.
Ludd, grands prismes de Nicol, 135.
Lumière, familière aux anciens, 5.
— électrique, sa génération, 6.
— aberration physique de la, 9.
— sa propagation rectiligne, et son mode de production, 10.
— démonstration du principe que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence, 11.
— stérilité du moyen âge dans le domaine de la lumière, 14.
— histoire de sa réfraction, 15.
— démonstration de la réflexion partielle et totale de la, 15.
— vitesse de la, 23.
— découverte de son aberration par Bradley, 24.

— considérée au point de vue de la moindre action, 25.
— arc-en-ciel expliqué par Descartes, 27.
— analyse de la, par Newton, 28.
— synthèse de la lumière blanche, 29, 32.
— couleurs complémentaires, 32.
— bleue et jaune produisent du blanc par leur mélange, 39.
— quelle est la signification du noir ? 33.
— analyse de l'action des pigments sur la, 35.
— absorption de la, 36.
— mélange des pigments, contraste avec le mélange des lumières, 36.
— Wunsch, sur les trois couleurs constituantes de la lumière blanche, 42.
— sa complexité dans sa source, dans sa perception, etc., 41.
— ce que c'est, 46.
— Newton arrive à la théorie de l'émission de la, 49.
— Young découvre la théorie des ondulations, 53.
— illustration du mouvement des ondes, 59.
— interférence des ondes du son, 58.
— analogies du son et de la, 62, 66.
— vitesse de la, 69.
— principe de l'interférence des ondes de la. 70.
— phénomènes qui suggèrent, les premiers, la théorie ondulatoire de la, 71.
— adoption par Newton de la théorie de l'émission, et ses résultats, 85.
— transmise, 86.
— diffraction de la, 87.
— origine de la notion de l'attraction et de la gravitation, 102.
— polarité, comment elle est engendrée, 159.
— action des cristaux sur la, 107.
— réfraction de la, 117, 118.
— élasticité et densité, 119.
— double réfraction, 119.
— phénomènes chromatiques produits par les cristaux, 132.
— sur la lumière polarisée, 122.
— mécanisme de la, 123.
— vibrations de la, 124.
— composition et décomposition des vibrations, 138.
— polariseur et analyseur, 139.
— recomposition des deux systèmes d'onde par l'analyseur, 140.
— interférences rendues ainsi possibles, 141.
— phénomènes chromatiques produits par le quartz, 133.
— objective, éther lumineux, 137.
— monochromatique, 142.
— analyseur de l'état moléculaire, 148.
— des condensations et des raréfactions, 150.
— magnétisation de la, 152.
— anneaux entourant les axes des cristaux, 130.
— — du spath d'Islande, 155.
— — du cristal de roche, 130.
— — des cristaux à deux axes, 158.
— couleur et polarisation du firmament, 161, 167.
— échelle de la vision incommensurable avec l'échelle de la radiation, 173.
— fluorescence de la, 175, 176.
— — effet du thallène sur le spectre, 176.
— la vue n'est pas le seul sens excité par la lumière solaire ou électrique, 179.
— transparence de la, 182.
— rayons ultra-rouges, 183.
— rôle joué dans la nature par ces rayons, 188.
— conversion des rayons de chaleur en rayons de lumière, 187.
— identité de la chaleur et de la lumière rayonnante, 190.
— polarisation de la chaleur, 189.
— principes de l'analyse spectrale, 201.
— spectres des vapeurs incandescentes, 202.
— raies de Fraunhofer, leur explication par Kirchhoff, 220.
— chimie solaire, 221.
— démonstration de l'analogie du son et de la, 222.
— Kirchhoff et ses précurseurs, 216.
— protubérances rouges du Soleil, 218.
— résultats obtenus par divers chercheurs, 219.
— sommaire et conclusions, 219.
Lycopode, effets de diffraction causés par ses spores, 96.

## M

Magnétisation de la lumière, 153.
Marronnier, écorce de, 179.
Malus, sa découverte de la lumière polarisée par réflexion à la surface du spath d'Islande, 125.
— découvre la polarisation de la lumière par réflexion, 125.
Masson, son essai sur les bandes de l'étincelle d'induction, 215.
Melloni, sur la polarisation de la chaleur, 169.
Métaux, combustion des, 201.
— analyse spectrale des, 202.
— bandes des spectres des métaux prouvées caractéristiques de leurs vapeurs par Bunsen et Kirchhoff, 203.
Mica, couleur des plaques minces de, 76.
— dépolariseur, 136.
Mill (John Stuart), son scepticisme relativement à la théorie ondulatoire de la lumière, 161.
Miller (Dr), ses dessins et sa description des spectres de diverses flammes colorées, 214.
— découverte du *rubidium*, 205.
Milieu absorbant, 38.
Miroir tournant, vitesse du rayon réfléchi, 12.
Moïse, son génie, 22.
Morton (professeur), sa découverte du thallène, 176.
Mouvement vibratoire de la lumière, soupçonné par Hooke, 78.
— moyen et fin, 189.

## N

Nacre de perle, 100.
Nature, son interprétation par les sauvages, 41.
Newton (sir Isaac), ses expériences sur la composition de la lumière solaire, 27.
— son spectre, 28.
— découvre la dispersion, 29.
— arrive à la théorie de l'émission de la lumière, 49.
— ses objections contre la conception de l'éther, supposée et soutenue par Huyghens et Euler, 63.
— sa carrière optique, 79.
— ses anneaux, 80.
— épouse la théorie de l'émission, 85.
— ses anneaux expliqués par la théorie des accès, 84.
— sa découverte de la loi de la proportionnalité, 84.
— ses idées sur la gravitation, 102.
— ses erreurs, 221.
Niagara, interférence des ondes liquides, 60.
Nicol, son prisme, 134.
Nobili, pile thermo-électrique, 189.
Noir, sa signification, 33.
Nuage actinique, 168.
— sa polarisation, 169, 171.

## O

Obscurité, silence de l'éther, 70.
Océan, sa couleur, 170.
Œrsted découvre la déviation de l'aiguille aimantée par le courant électrique, 189.
Ohm, ses lois, 232.
Œil, va se perfectionnant, 8.
— est une merveille pour celui qui réfléchit, 9.
— son achromatisme imparfait, 9.
Ombres opposées par Newton à la théorie des ondulations, 67.
Ondes de l'eau, 57.
— longueur d', 58.
— interférences des ondes, 58.
— avance ou retard des, 141.
— ramenées au même plan, 141.

## P

Pasteur, raison des désastres de la France dans la dernière guerre avec l'Allemagne, 233.
Persistance des images sur la rétine, 33.
Physiques (théories), leur origine, 45.
Pigments, analyse de l'action de la lumière sur les, 35.
— leurs mélanges contrastent avec ceux de la lumière, 36.
— cause du vert résultant de leur mélange, révélée par Helmholtz, 39.
Pile voltaïque, son usage comme source de chaleur et de lumière, 7.
— thermo-électrique, 189.
— de glaces, instrument polarisant, 130.
Plan de polarisation, 115.
— sa rotation, 130.
— de vibrations, figures, 142.

Plaques minces, leurs couleurs, 71.
— de mica, 76.
— de verres pressés l'un contre l'autre, leurs couleurs, 76.
Plücker, ses dessins du spectre, 215.
Polariscope, sa glace étamée, 141.
— verre étamé dans le, 142.
Polarisation de la lumière, 122.
— produite par la tourmaline, 123.
— par réflexion et par réfraction, 125.
— rectiligne ou plane, 123.
— et dépolarisation, 131.
— chromatique, phénomènes produits par les cristaux dans la lumière polarisée, 132.
— — des cristallisations irrégulières, 144.
— — des substances organiques, 144.
— — des verres étirés ou comprimés, 145.
— — des verres chauffés, 147.
— circulaire, 141.
— de la lumière du firmament, 171.
— du firmament artificiel, 171.
— de la chaleur rayonnante, 193.
Polarité, sa notion, comment elle est engendrée, 103.
— atomique, 106.
Pôles d'un aimant, 103.
Powell (professeur), sur la polarisation de la chaleur, 19.
Pratique, science pratique, homme pratique, 225.
Prisme de Nicol, 34.
Professeur et chercheur, 220.
Proportionnalité, loi decouverte par Newton, 84.
Protubérances solaires, 216.

## Q

Quartz, ses phénomènes chromatiques, 108.
— dextrogyres, lévogyres, 150.
— couleurs complémentaires, 153.
— plaque à deux rotations, 154.

## R

Radiations lumineuses, chimiques, thermiques, 173 et suiv.
— invisibles, leur position et leur étendue, 198.
Raies du spectre, 201.
— caractéristiques des métaux, 203.
— de Fraunhofer, 205.
Raymond (du Bois-), ses expériences sur l'électricité animale, 13.
Rayons et faisceaux, 9.
— ordinaire et extraordinaire, 121.
— lumineux ou visibles, 173.
— chimiques, 174.
— ultra-rouges ou obscurs, 188.
Réflexion partielle et totale, 13.
— totale, sa preuve et ses lois, 19.
— angulaire du rayon, 13.
— et réfraction à la surface des corps, 38.
Réfraction, démonstration du fait de la, 15.
— de la lumière, ses lois, 17.
— double, 119.
— conique, 222.
Réseau donnant les couleurs de diffraction, 99, 159.
Résistance au courant électrique, 203.
Respighi, protubérances, 218.
Réversibilité, principe de la, 18.
Ritter, sa découverte des rayons ultra-violets du Soleil, 218.
Rœmer (Olaus), observation des satellites de Jupiter, 21.
— sa détermination de la vitesse de la lumière, 23.
— prouve la non-instantanéité de la propagation de la lumière, 48.
Rouille du fer, ce que c'est, 205.
Rubidium, sa découverte, 205.

## S

Savon, bulles de, leurs couleurs, 72.
Schwerd, ses observations de la diffraction, 197.
Science, ses accroissements, 189.
Scintillation des étoiles, 99.
Schelling, son mépris des connaissances expérimentales, 15.
Scoresby (Dr), réussit à enflammer la poudre par les rayons rendus convergents par une lentille de glace, 181.
Secchi, chimie du Soleil et protubérances, 214.
Seebeck (Thomas), découvre la thermo-électricité, 189.
— la polarisation de la lumière par la tourmaline, 222.
Sel ammoniac, sa cristallisation, 110.
Sélénite, expériences avec des lames minces et épaisses de, 136.
— beaux effets de polarisation chromatique, 137.

Sirène, instrument pour la mesure des vibrations, 67.
Snell (Willebrod), sa loi de la réfraction, 15.
— importance de cette loi, 16.
Sodium, ses raies brillantes, 212.
— ses raies noires par absorption, 214.
Son, premières notions des anciens sur le, 56.
— interférences des ondes du, 66.
— ton du, 66.
— son intensité, 66.
— analogies de la lumière et du, 66.
— démonstration de cette analogie, 211, 212.
Soleil, chimie du, 209.
— analyse du spectre du, 208.
— ses protubérances rouges, 218.
— recherches sur la chimie du, 217.
Spath d'Islande, polariseur et analyseur, 129.
Spath, 108.
Spectre magnétique, 105.
Spectre (analyse du), 201.
— des vapeurs incandescentes, 202.
— discontinu, 202.
— sa portée comme agent de découvertes, 206.
— du Soleil et des étoiles, 206.
Spectroscope, sa construction par M. Browning, 136.
Spottiswoode (William), 136.
— ses recherches sur les spectres de la lumière polarisée, 122.
— *Lignum nephreticum*, sa fluorescence, 178.
— Balfour (Stewart), professeur, ses recherches d'analyse spectrale, 215.
Stokes (professeur), suggère l'idée d'un firmament artificiel, 169.
— Résultats de son examen des substances excitées par les rayons ultra-violets, 178.
— sa découverte de la fluorescence, 176.
— sur la fluorescence, 176.
— précède presque Kirchhoff dans sa découverte, 211.
— ses recherches d'analyse spectrale, 214.
Sturgeon, découvertes électromagnétiques, 232.
Sulfate de quinine, sa fluorescence d'abord observée par sir John Herschel, 179.
Surface réfléchissante, écume, 38.
Surfaces striées, leurs couleurs, 99, 159.

## T

Talbot, ses expériences, 214.
Terre, son orbite diurne, 84.
Thallène, sa découverte, 176.
— ses effets sur le spectre, 176.
Thallium, son analyse spectrale, 203.
— sa découverte, 202.
— obtenu en lingots par M. Lamy, 205.
Théories, leurs rapports avec l'expérience, 101.
— physiques, leur origine, 45.
— quand elles deviennent certaines, 133.
— ondulatoire de la lumière, ses bases, 54.
— — principale objection contre elle de sir David Brewster, 51.
— — Young en pose les fondements, 52.
— — phénomènes qui la suggérèrent les premiers, 71.
— — scepticisme de M. Mill à son égard, 161.
— — essai du président Bernard, 161.
— — démontrée de bien des manières par Young, 50.
Thermo-électricité, sa découverte, 189.
Tombelaine, mont, son image renversée, 20.
— Ton du son, 60.
Tocqueville (de), l'homme du nord, 227.
— république et science, 234.
Tourbillons rapides de la rivière du Niagara, 60.
— illustration du principe des interférences d'ondes qu'ils produisent, 61.
Tourmaline, polarisation de la lumière produite par son moyen, 123.
Transmission de la lumière, sa raison, 182.
Transparence, remarques sur la, 182.

## U

Ultra-violets (rayons), 218.
— découverts par Ritter, 186.
— leurs effets, 124.
— leur rôle dans la nature, 188.

## V

Vagues, leur mouvement ondulatoire, 156.
Vapeurs incandescentes, raies de leur spectre, 202.
Vassenius décrit en 1733 les protubérances rouges du Soleil, 216.
Verre, 129.
— trempé ou comprimé, ses couleurs et ses anneaux, 145.
Vibrations longitudinales, transversales, 63.
— leur illustration, 64.
— lumineuses, 124.
— décomposition des, 138.
— composition des, 140.
Vérification, base de la certitude des théories, 123.
Vitalité de la science, 200.
Vitellius, son intelligence et sa conscience, 220.
— ses recherches sur la lumière, 220.
Vitruve, les ondes du son, 56.
Volta (pile de), ses usages et la chaleur qu'elle produit, 7.
— électricité, 221.

## W

Watt, son génie, 227.
Wertheim, appareil à l'aide duquel il détermine la tension et la pression au moyen des couleurs de la lumière polarisée, 146.
Wheatstone (sir Charles), 178.
— son analyse de la lumière de l'étincelle électrique, 214.
Willingen (van der), ses dessins du spectre, 215.
Wilson, cas qu'il fait de la science, 14.
Wollaston (docteur), sa découverte des raies du spectre, 205.
— sa découverte des anneaux du spath d'Islande, 222.
Woodbury, sur l'impureté des couleurs naturelles, 39.
Wünsch (Christian Ernst), sur les trois couleurs simples de la lumière blanche, 42.
— ses expériences, 42.

## Y

Youmans (professeur), son énergie et son habileté, 2.
Young (Dr Thomas), sa découverte des hiéroglyphes égyptiens et de la théorie ondulatoire de la lumière, 53.
— éloge qu'en fait Helmholtz, 53.
— ridiculisé par Brougham, 54.
— rétabli dans ses droits par Fresnel et Arago, 55.
— généralise les observations de Grimaldi, 55.
— photographie les anneaux ultraviolets de Newton, 174.
— ses résultats relativement à la chimie du Soleil, 174.
Young, astronome américain, chimie solaire et protubérances solaires, 218.

FIN.

1277 Paris. — Imprimerie de GAUTHIER-VILLARS, quai des Augustins, 55

2652.029